

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

UM ESTUDO DO MÉTODO DA CONTINUAÇÃO
APLICADO A ANÁLISE DO MÁXIMO CARREGAMENTO
DOS SISTEMAS DE POTÊNCIA

‘Dissertação submetida como parte dos requisitos para a
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica’

Cláudia Cristina Pereira

Florianópolis, Agosto de 1998

**UM ESTUDO DO MÉTODO DA CONTINUAÇÃO APLICADO A ANÁLISE DO
MÁXIMO CARREGAMENTO DOS SISTEMAS DE POTÊNCIA**

CLÁUDIA CRISTINA PEREIRA

'Esta dissertação foi julgada para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia Elétrica,

Área de Concentração em Sistemas de Potência
e aprovada em sua forma final pelo Curso de Pós-Graduação.'

Roberto Salgado

Prof. Roberto Salgado, PH.D.

Orientador

Adroaldo Raizer ~~Dr.~~ *Dr.*

Coordenador do Curso

Banca Examinadora

Roberto Salgado

Prof. Roberto Salgado, PH.D.

Orientador

Katia Campos de Almeida

Prof. Katia C. de Almeida, PH.D.

Co-orientadora

Hans Helmut Zürn

Prof. Hans Helmut Zürn, PH.D.

Aguinaldo Silveira e Silva

Prof. Aguinaldo Silveira e Silva, PH.D.

Jorge Mário Campagnolo

Prof. Jorge Mário Campagnolo, D.Sc.

Dedicada ao meu marido Luiz pelo amor
e compreensão, que soube superar a distância
e sem a qual a realização deste trabalho
teria sido muito mais difícil

**A minha mãe pelo amor, apoio e confiança
que sempre demonstrou por mim**

AGRADECIMENTOS

Aos meus Orientadores Prof. Roberto Salgado e Profª. Katia C. de Almeida pela orientação, dedicação, incentivo, paciência e amizade demonstrada no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Corpo Docente do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFSC que transmitiram seus conhecimentos, especialmente aos Professores Aguinaldo, Hans, Campagnolo, Simões e Jacqueline.

Agradeço ao Laboratório de Sistemas de Potência (LABSPOT) pela infraestrutura e apoio.

À amiga Ana Paula pelo suporte técnico prestado, paciência e amizade, ao longo destes anos.

Aos colegas Luciano, Edgardo e Nicole pelo apoio, incentivo e amizade demonstrados ao longo deste trabalho.

A todos os colegas do LABSPOT pela convivência alegre e produtiva.

À CAPES, pelo apoio financeiro ao Curso

RESUMO

Este trabalho aborda o problema de determinação do máximo carregamento de um sistema de potência, sob o ponto de vista de análise da estabilidade de tensão. A operação da rede elétrica em condições limite no que diz respeito à capacidade dos equipamentos, tem exigido o desenvolvimento de métodos adequados tanto para a determinação da solução das equações do fluxo de potência no ponto de máxima demanda, como para a detecção da proximidade do ponto crítico sob o aspecto de estabilidade de tensão.

Apresenta-se a aplicação do Método da Continuação ao problema de determinação da máxima demanda da rede elétrica. Este método pode ser formulado em coordenadas polares e em coordenadas retangulares. Uma metodologia baseada na modelagem em coordenadas retangulares é mostrada, em duas versões diferentes no que diz respeito à etapa de correção do Método da Continuação. Subprodutos das etapas intermediárias do processo iterativo são usados para a obtenção de informações sobre quais áreas e barras são as mais críticas em relação a problemas de instabilidade de tensão.

Os resultados da aplicação da metodologia a sistemas de variados portes ilustram a potencialidade da abordagem baseada no Método da Continuação para a detecção e identificação de áreas sujeitas ao colapso de tensão, em estudos de planejamento e operação.

ABSTRACT

This work focuses the problem of maximum load capability of a power system, through the analysis of the bus voltage behaviour. The operation of transmission/generation systems at high load levels, close to the maximum capability of the power system components and devices, has raised the need to develop computational methods to calculate the power flow equations at the maximum load point and to detect the proximity of the critical point with respect to voltage stability.

The Continuation Method, applied to the calculation of the maximum load, is presented. This method can be formulated in rectangular or polar coordinates. A methodology based on rectangular coordinates is described with two different versions of the corrector steps of the continuation method. By-products of the intermediate steps of the iterative process are used to indicate the critical bus of the power system with respect to voltage instability.

The method was applied to several systems, and the results show the potential of the proposed approach to detect and identify areas where voltage collapse can occur in both operating and planning studies.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	v
RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	xii
LISTA DE TABELAS	xv
CAPÍTULO 1	
INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2	
O MÉTODO DA CONTINUAÇÃO	4
2.1 INTRODUÇÃO	4
2.2 MÉTODO DA CONTINUAÇÃO	5

2.2.1 Preditor	8
2.2.1.1 Métodos EDO; Preditor Tangente	8
2.2.1.2 Extrapolação Polinomial; Preditor Secante	11
2.2.1.3 Forma Alternativa de Predição	13
2.2.2 Reformulação das Equações para a Etapa de Correção	14
2.2.2.1 Parametrização por Adição de uma Equação	15
2.2.2.2 Parametrização do Comprimento de Arco	16
2.2.2.3 Parametrização Local	17
2.2.2.4 Reformulação por Definição da Trajetória	18
2.2.2.5 Interpretação Gráfica	19
2.2.3 Corretor	21
2.2.4 Controle do Passo	22
2.3 Conclusão	23

CAPÍTULO 3

MÉTODO DA CONTINUAÇÃO APLICADO A

SISTEMAS DE POTÊNCIA	24
3.1 INTRODUÇÃO	24
3.2 ASPECTOS GERAIS	24
3.3 O ESTUDO DA ESTABILIDADE DE TENSÃO	27
3.3.1 Análise Estática	28
3.4 O MÉTODO DA CONTINUAÇÃO	31
3.4.1 Formulação em Coordenadas Polares	31
3.4.1.1 Exemplo 1 - Formulação em Coordenadas Polares	39
3.4.1.1.1 Abordagem A	42

3.4.1.1.2 Abordagem B	46
3.4.2 Formulação em Coordenadas Retangulares	50
3.4.2.1 Exemplo 2 – Formulação em Coordenadas Retangulares	52
3.4.2.2 Exemplo 3 – Preditor Secante	56
3.4.3 Índices de Proximidade	58
3.5 CONCLUSÃO	62
CAPÍTULO 4	
RESULTADOS	63
4.1 INTRODUÇÃO	63
4.2 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	63
4.3 FORMAS DE ANÁLISE	65
4.4 SISTEMA IEEE – 14 BARRAS	66
4.4.1 Sem Limite de Potência Reativa	67
4.4.2 Com Limite de Potência Reativa	77
4.5 SISTEMA IEEE – 57 BARRAS	84
4.5.1 Sem Limite de Potência Reativa	84
4.5.2 Com Limite de Potência Reativa	91
4.6 SISTEMA IEEE – 118 BARRAS	95
4.6.1 Sem Limite de Potência Reativa	96
4.6.2 Com Limite de Potência Reativa	100
4.7 SISTEMA SUL-SUDESTE REDUZIDO – 176 BARRAS	101
4.7.1 Sem Limite de Potência Reativa	103
4.7.2 Com Limite De Potência Reativa	106
4.8 CONCLUSÃO	110

CAPÍTULO 5

CONCLUSÃO 111

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 114

BIBLIOGRAFIA 115

APÊNDICE A

FORMULAÇÃO DO FLUXO DE POTÊNCIA EM

COORDENADAS CARTESIANAS 121

A.1 INTRODUÇÃO 121

A.2 O MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON 123

A.3 ALGORITMO 127

APÊNDICE B

DADOS DOS SISTEMAS TESTADOS 129

B.1 INTRODUÇÃO 129

B.2 SISTEMA IEEE – 14 BARRAS 130

B.3 SISTEMA IEEE – 57 BARRAS 131

B.4 SISTEMA IEEE – 118 BARRAS 135

B.5 SISTEMA SUL-SUDESTE DE 176 BARRAS 144

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 :	Princípio preditor-corretor	7
Figura 2.2 :	Preditor secante	12
Figura 2.3 :	Diferentes trajetórias	19
Figura 2.4 :	Gráfico ilustrando o conceito de hiperplano perpendicular	20
Figura 3.1 :	Gráfico mostrando as duas regiões de operação	26
Figura 3.2 :	Diagrama unifilar para o sistema de 3 barras	40
Figura 4.1 :	dos perfis de tensão inicial e final para o sistema de 14 barras, sem limite de reativo	67
Figura 4.2 :	Curva P-V da barra 5 do sistema de 14 barras, sem limite de reativo	68
Figura 4.3 :	Curva P-V da barra 14 do sistema de 14 barras, sem limite de reativo	68
Figura 4.4 :	Curva P-V da barra 14 do sistema de 14 barras, sem limite de reativo, obtida pelo PFLOW	69
Figura 4.5 :	Curva Q-V da barra 14 do sistema de 14 barras, sem limite de reativo	70
Figura 4.6 :	Curva P-V da barra 5 do sistema de 14 barras sem shunt e sem limite de reativo	74
Figura 4.7 :	Curva P-V da barra 14 do sistema de 14 barras sem shunt e sem limite de reativo	74
Figura 4.8 :	Curva P-V da barra 5 do sistema de 14 barras com alocação de shunt e sem limite de reativo	75
Figura 4.9 :	Curva P-V da barra 14 do sistema de 14 barras com alocação de shunt e sem limite de reativo	75
Figura 4.10 :	Perfis de tensão inicial e final para o sistema de 14 barras, com limite de reativo	78
Figura 4.11 :	Curva P-V da barra 5 do sistema de 14 barras, com limite de reativo	80

Figura 4.12 :	Curva P-V da barra 14 do sistema de 14 barras, com limite de reativo	80
Figura 4.13 :	Curva Q-V da barra 14 do sistema de 14 barras, com limite de reativo	80
Figura 4.14 :	Curva Q-V da barra 3 do sistema de 14 barras, com limite de reativo	81
Figura 4.15 :	Perfis de tensão inicial e final para o sistema de 57 barras, sem limite de reativo	85
Figura 4.16 :	Curva P-V para barra 31 do sistema de 57 barras, sem limite de reativo	85
Figura 4.17 :	Curva P-V completa para barra 31 do sistema de 57 barras, sem limite de reativo	86
Figura 4.18 :	Curva Q-V da barra 31 do sistema de 57 barras, sem limite de reativo	86
Figura 4.19 :	Curva P-V para barra 31 do sistema de 57 barras, sem limite de reativo, com alocação de potência reativa shunt	90
Figura 4.20 :	Perfis de tensão inicial e final para o sistema de 57 barras, com limite de reativo	92
Figura 4.21 :	Curva P-V para barra 31 do sistema de 57 barras, com limite de reativo	93
Figura 4.22 :	Curva P-V para barra 31 do sistema de 57 barras obtida pelo PFLOW, sem limite de reativo	93
Figura 4.23 :	Curva Q-V da barra 31 do sistema de 57 barras, com limite de reativo	94
Figura 4.24 :	Curva P-V da barra 23 do sistema de 118 barras, sem limite de reativo	97
Figura 4.25 :	Curva P-V da barra 74 do sistema de 118 barras, sem limite de reativo	97
Figura 4.26 :	Tensões inicial e final para as barras do sistema de 118 barras, sem limite de reativo	98
Figura 4.27 :	Tensões inicial e final para as barras do sistema de 118 barras,	100

	com limite de reativo	
Figura 4.28 :	Curva P-V da barra 41 do sistema de 118 barras, com limite de reativo	101
Figura 4.29 :	Curva P-V da barra 53 do sistema de 118 barras, com limite de reativo	101
Figura 4.30 :	Tensões inicial e final para as barras do sistema de 176 barras, sem limite de reativo	103
Figura 4.31 :	Curva P-V da barra 10 do sistema de 176 barras, sem limite de reativo	104
Figura 4.32 :	Curva P-V da barra 15 do sistema de 176 barras, sem limite de reativo	104
Figura 4.33 :	Tensões inicial e final para as barras do sistema de 176 barras, com limites de potência reativa	107
Figura 4.34 :	Curva P-V da barra 1 do sistema de 176 barras, com limite de reativo	108
Figura 4.35 :	Curva P-V da barra 2 do sistema de 176 barras, com limite de reativo	108

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 :	Dados de barra	40
Tabela 3.2 :	Dados de linha	40
Tabela 3.3 :	Solução do fluxo de carga	40
Tabela 4.1 :	Número de condicionamento das matrizes Jacobiana convencional e aumentada, do sistema de 14 barras, sem limite de reativo	71
Tabela 4.2 :	Resultados finais, com despacho da geração ativa, para o sistema de 14 barras, sem limite de reativo	73
Tabela 4.3 :	Fluxos ativos nas linhas de transmissão do sistema de 14 barras, sem limite de reativo	73
Tabela 4.4 :	Resultados para o sistema de 14 barras, com e sem alocação de shunt reativo, para o sistema sem limite de reativo	74
Tabela 4.5 :	Resultados finais da geração ativa para o sistema de 14 barras, sem limite de reativo	77
Tabela 4.6 :	Número de condicionamento das matrizes Jacobiana convencional e aumentada, do sistema de 14 barras, com limite de reativo	81
Tabela 4.7 :	Resultados finais, com despacho da geração ativa, para o sistema de 14 barras, com limite de reativo	82
Tabela 4.8 :	Fluxos ativos nas linhas de transmissão do sistema de 14 barras, com limite de reativo	83
Tabela 4.9 :	Resultados finais da geração ativa para o sistema de 14 barras, com limite de potência reativa	84
Tabela 4.10 :	Número de condicionamento das matrizes Jacobiana convencional e aumentada, do sistema de 57 barras, sem limite de reativo	87
Tabela 4.11 :	Resultados finais da geração ativa para o sistema de 57 barras, sem limite de reativo	88

Tabela 4.12 :	Fluxos ativos nas linhas de transmissão do sistema de 57 barras, sem limite de reativo	89
Tabela 4.13 :	Resultados para o sistema de 57 barras sem limite de reativo, com e sem alocação de compensação de reativo	89
Tabela 4.14 :	Número de condicionamento das matrizes Jacobiana convencional e aumentada, do sistema de 57 barras, com limite de reativo	94
Tabela 4.15 :	Resultados finais da geração ativa para o sistema de 57 barras, com limite de potência reativa	96
Tabela 4.16 :	Número de condicionamento das matrizes Jacobiana convencional e aumentada, do sistema de 118 barras, sem limite de reativo	98
Tabela 4.17 :	Número de condicionamento das matrizes Jacobiana convencional e aumentada, do sistema de 118 barras, com limite de reativo	101
Tabela 4.18 :	Classificação das barras mais críticas no último ponto convergido, do sistema de 176 barras sem limite de reativo	104
Tabela 4.19 :	Número de condicionamento das matrizes Jacobiana convencional e aumentada, do sistema de 176 barras, sem limite de reativo	105
Tabela 4.20 :	Condicionamento numérico da matriz Jacobiana convencional, com dados do caso base e com dados do máximo carregamento, para o sistema de 176 barras	105
Tabela 4.21 :	Classificação das barras mais críticas no último ponto convergido, do sistema de 176 barras com limite de reativo	107
Tabela 4.22 :	Condicionamento numérico da matriz Jacobiana convencional, de predição e de correção, do sistema de 176 barras, com limite de potência reativa	108
Tabela B.1 :	Dados das linhas de transmissão do sistema IEEE de 14 barras	130
Tabela B.2 :	Dados das barras do sistema IEEE de 14 barras	131
Tabela B.3 :	Dados das linhas de transmissão do sistema IEEE de 57 barras	133

Tabela B.4 :	Dados das barras do sistema IEEE de 57 barras	135
Tabela B.5 :	Dados das linhas de transmissão do sistema IEEE de 118 barras	141
Tabela B.6 :	Dados das barras do sistema IEEE de 118 barras	144
Tabela B.7 :	Dados das linhas de transmissão do sistema sul-sudeste de 176 barras	152
Tabela B.8 :	Dados das barras do sistema sul-sudeste de 176 barras	157

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A partir de um passado relativamente recente, o crescimento cada vez maior da demanda e a falta de investimentos na ampliação e manutenção dos sistemas de energia elétrica, tem levado os sistemas a operar próximos de seus limites máximos, no que diz respeito à capacidade de carregamento. Por este motivo tornou-se importante determinar com precisão até que ponto um sistema pode ter a sua demanda elevada mantendo condições operacionais normais.

Em alguns casos, o crescimento desordenado da demanda provocou em certos sistemas o que se classificou como “instabilidade de tensão”, com o eventual aparecimento de um fenômeno chamado “colapso de tensão”. A concepção de estabilidade de tensão está ligada à habilidade que um sistema elétrico de potência possui em manter os perfis de tensões em níveis aceitáveis em todas as barras, em condições normais ou após ter sofrido uma perturbação.

Um sistema está instável no que diz respeito à magnitude da sua tensão nodal quando uma perturbação (crescimento súbito de carga e/ou contingência) causa um progressivo e descontrolado declínio no perfil de tensão nas barras do sistema. Em geral, a instabilidade de tensão é causada pela incapacidade ou insuficiência de suporte de potência reativa, visto que o perfil de tensão está fortemente associado à distribuição de potência reativa.

Os sistemas de energia elétrica também ficam sujeitos a diversas ocorrências quando operados em condições-limite. Além da deterioração do perfil de tensões, o

aumento exagerado das perdas de potência ativa, a exigência na geração de reativos e a eventual ultrapassagem do limite térmico das linhas de transmissão podem ser citados como consequências frequentes deste fenômeno.

Em função do exposto, nota-se que é de extrema importância conhecer com precisão o ponto de operação atual do sistema, a proximidade que este se encontra de alguma situação de funcionamento indesejável em termos de segurança e qualidade de serviço. A partir destas informações, é possível determinar os ajustes necessários para prevenir ou corrigir as situações indesejáveis.

O problema da estabilidade de tensão, a rigor deveria ser tratado utilizando-se técnicas analíticas e computacionais que levassem em consideração a natureza dinâmica da rede elétrica. Entretanto, em algumas circunstâncias a instabilidade de tensão se processa de forma lenta, o que possibilita que uma análise baseada em modelos estáticos seja aplicada, resultando em moderados requisitos computacionais [Sodr96].

As metodologias que utilizam modelos estáticos são geralmente baseadas nas informações obtidas via estudo de fluxo de potência convencional. A análise estática pode fornecer medidas práticas da proximidade da instabilidade de tensão, além de indicar as áreas que potencialmente possuem problemas de estabilidade de tensão. Este tipo de metodologia requer um conhecimento não muito detalhado do sistema a ser analisado, o que constitui uma de suas principais vantagens. Para fazer a determinação da máxima demanda, várias são as técnicas propostas na literatura, entre elas, pode-se citar:

- ◆ via Método da Continuação [Tira88], [Iba91], [Ajja92], [Cañi93];
- ◆ via Múltiplas Soluções [Tamu83], [Iba90];
- ◆ via Otimização Estática [Iris96], [Barb97];
- ◆ via Métodos Diretos [Cañi93];
- ◆ via Mínimo Valor Singular [Tira88], [Lemo95]; e
- ◆ via Autovalores [Gao92], [Cañi96].

O presente trabalho tem por finalidade realizar um estudo da determinação do máximo carregamento de um sistema de energia elétrica através do Método da Continuação. No que diz respeito ao modelo representativo do sistema de potência, foram utilizadas as equações não lineares da rede elétrica expressas em coordenadas retangulares. O algoritmo numérico aplicado é basicamente o de Newton-Raphson para a solução de

equações não lineares. Analisaram-se ainda, subprodutos das etapas intermediárias do Método da Continuação, tais como as componentes do vetor tangente de predição, como indicadores de barras que potencialmente estão sujeitas à instabilidade de tensão.

A presente dissertação está distribuída na forma apresentada a seguir.

No Capítulo 2, o Método da Continuação é apresentado do ponto de vista analítico. São descritos em detalhes os elementos básicos que constituem o Método da Continuação: a parametrização, a predição, a correção e o controle do tamanho do passo.

O Capítulo 3 apresenta termos e definições básicas do problema de instabilidade de tensão. São analisadas as metodologias que melhor se adequam à compreensão e à solução de problemas relacionados a esse fenômeno. Neste capítulo, apresenta-se também a aplicação do Método da Continuação ao problema de determinação da máxima demanda a que se pode submeter a rede elétrica. A formulação deste método é apresentada em coordenadas polares e em coordenadas retangulares, e ilustrada com exemplos.

Os resultados obtidos através da implementação do Método da Continuação em coordenadas retangulares são apresentados no Capítulo 4. Os sistemas elétricos utilizados, são os sistemas-teste do IEEE de 14, 57 e 118 barras, e o equivalente de sistema real: o sistema Sul-Sudeste reduzido, com 176 barras. São feitas também comparações com os resultados obtidos através do programa computacional PFLOW, baseado no Método da Continuação em coordenadas polares, e via programa FLUPOT, de fluxo de potência ótimo.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões gerais desta dissertação e as sugestões para futuros trabalhos nesta área.

No Apêndice A é feita a formulação do fluxo de potência em coordenadas cartesianas.

No Apêndice B são apresentados os dados dos sistemas utilizados neste estudo.

CAPÍTULO 2

O MÉTODO DA CONTINUAÇÃO

2.1 INTRODUÇÃO

O Método da Continuação é uma ferramenta numérica útil para gerar conjuntos de soluções de equações algébricas não lineares parametrizadas. Várias implementações deste método têm sido relatadas na literatura [Seyd88], resultantes da sua aplicação com sucesso em uma variedade de problemas de engenharia, por exemplo, na área de sistemas de potência [Iba91, Ajja92, Cañi93]. Para gerar as soluções do sistema de equações não lineares, uma das possíveis implementações do Método da Continuação emprega um esquema de predição-correção. Isto é, numa primeira etapa uma solução é estimada com base num modelo linearizado. Posteriormente, resolve-se o referido sistema dentro de uma precisão estipulada, pelos métodos convencionais, a partir da solução estimada. Neste caso, os elementos básicos que constituem o Método da Continuação são: a parametrização, a predição, a correção e o controle da magnitude do passo.

Neste capítulo, apresenta-se o fundamento teórico do Método da Continuação, incluindo uma descrição detalhada de cada um dos seus elementos básicos.

2.2 MÉTODO DA CONTINUAÇÃO

Seja o sistema de equações algébricas não lineares

$$0 = f(y, \lambda) \quad (2.1)$$

o qual servirá como modelo para o presente estudo nas seções subseqüentes. Nesta equação, f é um vetor de n equações, y denota um vetor n -dimensional, e λ representa um parâmetro do sistema. Tem-se portanto um conjunto de n equações não lineares e $n+1$ incógnitas incluindo λ .

Neste trabalho, define-se como parâmetro uma quantidade que não pode ser controlada. Como parâmetros físicos do sistema de potência pode-se citar, por exemplo, cargas ativas e reativas, limites operacionais e parâmetros de linhas. Note, entretanto, que a definição de parâmetro engloba os parâmetros físicos e o que será definido aqui como parâmetros matemáticos. Parâmetros matemáticos serão considerados aqui quantidades que terão seus valores pré-especificados, dos quais dependerão os valores tanto de y como de λ . Neste trabalho, os parâmetros matemáticos serão denotados por γ .

A equação (2.1) é suposta possuir pelo menos uma solução para cada valor de λ . No caso mais geral, por causa da sua não linearidade, assume-se a existência de uma infinidade de soluções, algumas das quais utilizadas para compor as chamadas “curvas de solução” deste sistema, formadas pela variação de λ . Com relação a este aspecto, o teorema da Função Implícita [Seyd88] estabelece que “uma trajetória definida como uma curva contínua e diferenciável em λ e y , pode ser encontrada para equação (2.1), desde que a condição

$$\text{posto}(f_y, f_\lambda) = n \quad (2.2)$$

seja satisfeita”. Isto significa que a matriz $(f_y f_\lambda)$ deve possuir posto completo, com f_y e f_λ denotando as matrizes de derivadas parciais de f em relação a y e λ , respectivamente. Se a condição (2.2) é satisfeita em todo o intervalo de variação de λ , a existência de uma curva de soluções para o sistema não linear é garantida.

Para aplicar o Método da Continuação, assume-se que pelo menos uma solução da equação (2.1) possa ser obtida de forma trivial. Seja esta primeira solução da trajetória a ser determinada, denotada por (y^j, λ^j) . O objetivo da “continuação” é rastrear a trajetória $y(\lambda)$ desde a solução inicial considerada até um ponto limite. Assim, de forma genérica, no j -ésimo passo deste método parte-se de uma solução (y^j, λ^j) da equação (2.1) e calcula-se a solução (y^{j+1}, λ^{j+1}) para um novo valor de λ , denotado λ^{j+1} .

$$(y^j, \lambda^j) \rightarrow (y^{j+1}, \lambda^{j+1}).$$

O procedimento para a obtenção da nova solução, correspondente ao passo $j+1$, a partir da solução relativa ao passo j , pode ser dividido em duas etapas básicas, chamadas predição e correção. Este procedimento é sintetizado como

$$(y^j, \lambda^j) \xrightarrow{\text{predição}} (\bar{y}^{j+1}, \bar{\lambda}^{j+1}) \xrightarrow{\text{correção}} (y^{j+1}, \lambda^{j+1})$$

A Figura 2.1 apresenta a ilustração gráfica do procedimento baseado nas etapas de predição e correção. No ponto (y^j, λ^j) é feita uma linearização de f , a partir da qual é estimada a solução $(\bar{y}^{j+1}, \bar{\lambda}^{j+1})$. A forma de predição mostrada nesta figura é baseada no vetor tangente à curva no ponto onde é feita a linearização. O ponto estimado nesta direção, denominado “predito”, não é uma solução de $f(y, \lambda) = 0$, constituindo apenas uma aproximação da solução. A distância entre as soluções exata inicial (y^j, λ^j) e estimada ou predita $(\bar{y}^{j+1}, \bar{\lambda}^{j+1})$ é chamada *comprimento*, *magnitude* ou *tamanho do passo*. A facilidade com que a nova solução exata é determinada depende desta distância. Ou seja, quanto maior for a magnitude do passo, mais distantes se situarão as soluções corrigida (exata) e predita (aproximada). A predição permite gerar um ponto inicial a ser utilizado na

etapa subsequente, denominada etapa de correção, onde então é determinada a solução exata do conjunto de equações não lineares (2.1), dentro de uma tolerância pré-especificada. A obtenção da solução corrigida pode ser interpretada como a solução convencional das equações não lineares correspondente a um novo valor do parâmetro λ . Isto é, corrigir a solução aproximada significa determinar um ponto no lugar geométrico das soluções exatas de $f(y, \lambda)$, ou ainda, retornar à curva de soluções, partindo do ponto obtido na etapa de predição. A trajetória da solução predita à solução corrigida, depende de como o sistema de equações não lineares é resolvido a partir de $(\bar{y}^{j+1}, \bar{\lambda}^{j+1})$. Como se trata de um sistema com um número de incógnitas maior do que o de equações (subdeterminado), tem-se a liberdade de arbitrar a direção da correção, através da inclusão de uma equação adicional relacionando y e λ .

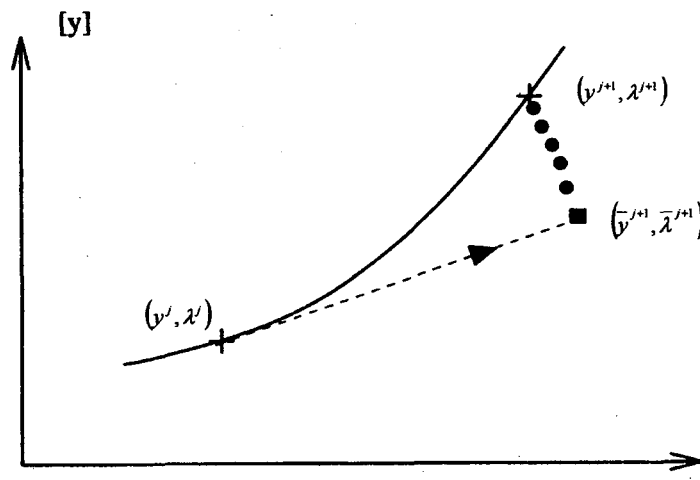


Figura 2.1. Princípio preditor-corretor

A distância entre duas soluções consecutivas (y', λ') e (y^{j+1}, λ^{j+1}) é função da estratégia de resolução utilizada. A seleção desta influencia consideravelmente tanto a eficiência como a confiabilidade do processo de determinação da solução corrigida. Nas subseções a seguir são descritas as principais formas de predição, parametrização e correção.

2.2.1 Preditor

Baseando-se num critério de aproximação estabelecido a priori, o preditor visa estimar uma solução aproximada, a qual facilite a determinação da solução exata. Conforme mostrado na Figura 2.1, no j -ésimo passo do processo iterativo, ao qual corresponde a j -ésima solução da equação (2.1), (y^j, λ^j) , o preditor estima um valor para a solução exata (y^{j+1}, λ^{j+1}) . A qualidade da precisão do ponto predito afeta significativamente o processo iterativo da fase de correção para se obter uma solução exata. Uma solução aproximada de melhor qualidade requer poucas iterações na fase da correção para alcançar a solução exata. Diferentes tipos de preditores têm sido propostos na literatura [Rabi77], [Seyd88], os quais podem basicamente ser divididos em duas classes: métodos baseados nas Equações Diferenciais Ordinárias (EDO) e métodos baseados na extrapolação polinomial.

2.2.1.1 Métodos EDO

Métodos baseados nas Equações Diferenciais Ordinárias (EDO) usam a solução corrente de $f(y, \lambda)$ e suas derivadas parciais para prever a próxima solução. A forma de predição ilustrada na figura 2.1, estabelecida com base na direção apontada pelo vetor tangente e referenciada na literatura como preditor tangente, é fundamentada nas EDO de primeira ordem resultantes da linearização.

As estratégias de predição baseadas nas EDO, derivadas da equação (2.1), são estabelecidas da seguinte forma: derivando-se os dois lados da equação (2.1), obtém-se

$$0 = df = f_y dy + f_\lambda d\lambda \quad (2.3)$$

e então

$$\frac{dy}{d\lambda} = -(f_y)^{-1} f_\lambda.$$

Integrando-se este sistema, partindo de um valor inicial (y', λ') , obtém-se a curva sobre a qual (y', λ') está situado. Este procedimento tende a falhar no ponto onde f_y , a matriz Jacobiana do sistema de equações não lineares com relação a y , é singular (no ponto de bifurcação estática) [Deck81],[Seyd88]. Uma forma de prevenir situações deste tipo no caso desta estratégia, é expressar o parâmetro λ em termos do comprimento de arco entre dois pontos considerados [Chan82]. Assim, tanto y como λ são considerados funções do parâmetro comprimento de arco s : $y = y(s)$, $\lambda = \lambda(s)$. Da equação (2.3) obtém-se

$$0 = f_y \frac{dy}{ds} + f_\lambda \frac{d\lambda}{ds} \quad (2.4a)$$

A equação (2.4a) é um sistema de n equações lineares e $n+1$ incógnitas. A seguinte equação é requerida para confirmar que s é o comprimento de arco sobre a curva [Kubi76], [Chia95]:

$$\left(\frac{dy_1}{ds}\right)^2 + \dots + \left(\frac{dy_n}{ds}\right)^2 + \left(\frac{d\lambda}{ds}\right)^2 = 1 \quad (2.4b)$$

Assim, o sistema a ser resolvido é composto pelas equações (2.1), com as variáveis em função de s , e (2.4b). Isto constitui um sistema determinado, de $n+1$ equações diferenciais em $n+1$ incógnitas. Ou seja, existe pelo menos uma solução para este sistema de equações. Subseqüentemente, será descrita a parametrização através do comprimento de arco, mostrando-se como evitar com esta reformulação, o problema de singularidade da matriz Jacobiana em pontos críticos.

Dentro da classe das estratégias baseadas em EDO, uma das mais utilizadas é a denominada *preditor tangente*. Denotando-se $dz_i = i$ -ésimo componente de dz , sendo

$$dz_i = dy_i \quad (1 \leq i \leq n), \quad dz_{n+1} = d\lambda,$$

e utilizando-se esta notação na equação (2.3), obtém-se na forma compacta a expressão

$$(f_y | f_\lambda) dz = 0 \quad (2.5)$$

para a tangente z . A condição de posto completo da equação (2.2) garante uma única tangente à curva em (y, λ) . Porém, desde que em (2.5) o número de equações é menor do que o de incógnitas, a normalização de dz pode ser utilizada para garantir a existência de uma única solução à equação (2.5). Segundo a referência [Seyd88], a normalização de dz é expressa pela equação $e_k^{tr} dz = 1$, com

$$e_k^{tr} dz = dz_k = 1,$$

onde e_k é um vetor de dimensão $n+1$, com todos os elementos iguais a zero exceto o k -ésimo elemento que é igual a um. Nesta equação, “ tr ” denota transposto. Portanto, a tangente dz é a solução do sistema linear

$$\left(\frac{f_y | f_\lambda}{e_k^{tr}} \right) dz = e_{n+1}. \quad (2.6)$$

Da mesma forma que a equação (2.5), esta última equação satisfaz a condição de posto completo (posto $(f_y | f_\lambda) = n$). Supondo que a equação (2.2) seja satisfeita, esta condição mantém-se ao longo de todo o intervalo de variação de λ , garantindo que a equação (2.6) tem uma única solução em qualquer ponto sobre a trajetória de soluções.

A última linha da equação do sistema linear (2.6) especifica o valor de uma variável. Ao longo do processo iterativo do Método da Continuação, diferentes variáveis (uma de cada vez) podem ter seu valor especificado, sendo em geral a variável λ especificada no início do processo. A equação adicionada melhora o condicionamento numérico da matriz Jacobiana [Aija92], e portanto a tangente pode ser calculada de uma forma mais segura sob o ponto de vista numérico. Ou seja, a última linha e_k^{tr} da matriz da

equação (2.6) pode ser substituída por qualquer outro vetor do mesmo tipo, tal que esta matriz possui sempre posto igual a $n+1$.

Várias abordagens baseadas no Método da Continuação utilizam os preditores tangente [Iba91], [Ajja92]. Nestas abordagens, o ponto predito (aproximação inicial) para (y^{j+1}, λ^{j+1}) é

$$(\bar{y}^{j+1}, \bar{\lambda}^{j+1}) = (y^j, \lambda^j) + \sigma_j dz \quad (2.7)$$

onde σ_j é um fator de magnitude do passo, grandeza a ser descrita detalhadamente a seguir.

2.2.1.2 Extrapolação Polinomial

Métodos baseados na extrapolação polinomial usam a solução corrente e as soluções anteriores para determinar uma solução aproximada. Estratégias estabelecidas de acordo com a direção definida pelo vetor secante, obtido como a diferença entre os valores das variáveis de duas iterações consecutivas são um exemplo de um preditor baseado na extrapolação polinomial.

As técnicas de predição que aplicam extrapolação polinomial são baseadas em um polinômio de ordem variada, cujo lugar geométrico representativo passa através da solução corrente e das soluções anteriores, para fornecer um ponto aproximado correspondente a próxima solução.

Seja um preditor em λ de grau ν que passa através dos $\nu+1$ pontos

$$(y^j, \lambda^j), (y^{j-1}, \lambda^{j-1}), \dots, (y^{j-\nu}, \lambda^{j-\nu})$$

Assume-se que este polinômio fornece uma aproximação da curva na região em que será calculado o próximo ponto ($\lambda \approx \lambda^{j+1}$). A predição consiste em calcular o polinômio em $\lambda = \lambda^{j+1}$.

O preditor trivial é o polinômio de ordem zero ($\nu = 0$), o qual usa a solução corrente como um ponto aproximado para próxima solução, isto é

$$(\bar{y}^{j+1}, \bar{\lambda}^{j+1}) = (y^j, \lambda^j). \quad (2.8)$$

O preditor, conhecido como secante, utiliza um polinômio de primeira ordem ($v = 1$) (uma reta), passando através das soluções corrente e anterior para prever a próxima, sendo uma alternativa para a tangente, na equação (2.7):

$$(\bar{y}^{j+1}, \bar{\lambda}^{j+1}) = (y^j, \lambda^j) + \sigma_j (y^j - y^{j-1}, \lambda^j - \lambda^{j-1}) \quad (2.9)$$

Para utilizar o preditor secante é necessário que se tenha pelo menos duas soluções da equação (2.1). No gráfico da Figura 2.2, mostra-se um preditor secante. Frequentemente o preditor tangente é empregado para calcular as soluções iniciais a serem utilizadas posteriormente no preditor secante. A vantagem no uso do preditor secante para o cálculo do ponto predito é que não há necessidade de inverter a Jacobiana aumentada, como no preditor tangente, para outros pontos além do primeiro ponto do processo iterativo. Da mesma forma que no caso do preditor tangente, a magnitude do fator de passo possui considerável influência na performance do preditor, pois dele depende a proximidade das duas soluções consecutivas que definem a reta secante à curva de solução.

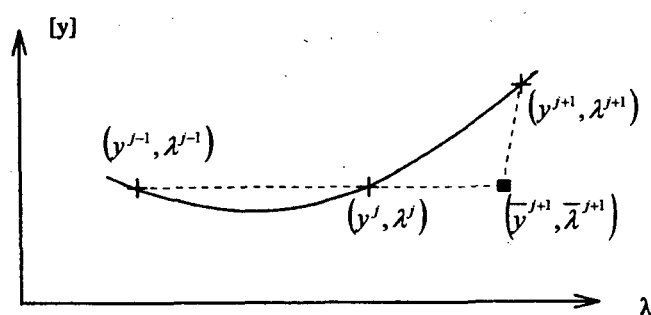


Figura 2.2. Preditor secante

Preditores baseados em polinômios de ordem superior podem ser semelhantemente derivados. Entretanto, Chiang *et al* [Chia95] afirmam que a experiência demonstra que preditores de ordem inferior são os mais eficazes.

2.2.1.3 Forma Alternativa de Predição

Um caminho alternativo para determinar o vetor direção Δy_1 , no ponto de equilíbrio (y_1, λ_1) sobre a curva de solução, é calcular o vetor tangente em cada ponto. Desde que $f(y_1, \lambda_1) = 0$, então

$$\begin{aligned} \frac{df}{d\lambda}\bigg|_1 &= D_y f\bigg|_1 \frac{dy}{d\lambda} + \frac{\partial f}{\partial \lambda}\bigg|_1 = 0 \\ \Rightarrow D_y f\bigg|_1 \frac{dy}{d\lambda} &= -\frac{\partial f}{\partial \lambda}\bigg|_1 \\ \Rightarrow \frac{dy}{d\lambda} &= -(D_y f\bigg|_1)^{-1} \frac{\partial f}{\partial \lambda}\bigg|_1 \end{aligned} \quad (2.10)$$

É possível notar, que o sistema de equações (2.10) é idêntico àquele representado na equação (2.3), sendo que esta última é mais compacta. Conforme mencionado anteriormente, para resolver este sistema de n equações e $n+1$ incógnitas é necessário adicionar uma equação, ou especificar o valor de uma variável. Pode-se, por exemplo, considerar $d\lambda = 1$ e resolver convencionalmente o referido sistema de equações. Neste caso, o vetor direção das variáveis envolvidas e o parâmetro de passo são calculados com base na normalização do vetor tangente, isto é,

$$\begin{aligned} \Delta\lambda &= \frac{k}{\|dy/d\lambda\|} \\ \Delta y &= \Delta\lambda \frac{dy}{d\lambda} \end{aligned} \quad (2.11)$$

onde $k \in \mathbb{R}^+$ é uma constante que controla o tamanho do passo preditor. A normalização em (2.11) resulta numa redução da magnitude do passo quando o sistema de equações se aproxima do ponto de bifurcação, ponto máximo de curvatura do ramo, visto que a magnitude do vetor tangente cresce quando o sistema está próximo deste ponto. Portanto, o tamanho do passo deve ser adequado para o tipo de aplicação utilizada. Isto é, valores

pequenos podem retardar a convergência global do processo iterativo, e valores elevados podem dificultar a solução das equações não lineares na etapa de correção.

Esta técnica de predição tem a vantagem de gerar uma aproximação do autovetor à direita no ponto de bifurcação, pois o vetor tangente converge para este autovetor no ponto crítico [Cañi94]. Entretanto, esta estratégia pode encontrar dificuldades quando a solução do sistema de equações não lineares está próxima do ponto de bifurcação, pois o sistema se torna mal-condicionado numericamente. Para evitar este problema, técnicas de parametrização podem ser usadas. A subseção a seguir descreve o fundamento teórico de algumas dessas técnicas.

2.2.2 Reformulação das Equações para a Etapa de Correção

Após a etapa de predição, a correção da solução aproximada é necessária. A tarefa executada nesta etapa consiste simplesmente em resolver as equações não lineares descritas pela expressão (2.1), para um novo valor de λ , a partir das condições iniciais calculadas na fase de predição. Entretanto, é necessário observar que este sistema possui um número de equações menor do que o de incógnitas, e portanto, para se obter uma solução o mesmo deve ser remodelado. Em outras palavras, um artifício deve ser utilizado para que se torne possível aplicar os algoritmos de solução do sistema de equações não lineares. Quando este artifício vincula a solução à especificação de um determinado parâmetro selecionado arbitrariamente, alguns autores [Seyd88] denominam o mesmo de *parametrização*, conceito utilizado ao longo deste trabalho. Se y e λ podem ser expressos em função de um parâmetro, γ , a curva de soluções do sistema de equações não lineares $f(y, \lambda)$ pode ser vista como uma função parametrizada. Note que, a partir deste ponto, λ , que é na realidade o *parâmetro físico* do modelo, passa a ser considerado uma função de γ , que é o *parâmetro matemático* do modelo. Três tipos básicos de esquemas de parametrização podem ser aplicados ao Método da Continuação[Seyd88]:

- parametrização por adição de uma equação;
- parametrização local;
- parametrização do comprimento de arco;

Diferentes parametrizações correspondem a diferentes direções de busca através da curva de soluções. O conjunto das equações não lineares pode alternativamente ser modificado pelo estabelecimento de condições analíticas que definam a direção da trajetória da solução predita à solução corrigida. As subseções seguintes descrevem as parametrizações acima e um tipo alternativo de reformulação do sistema (2.1).

2.2.2.1 Parametrização por Adição de uma Equação

Este tipo de parametrização consiste em expressar todas as grandezas do problema representado pela equação (2.1) em função de γ , isto é

$$y = y(\gamma), \lambda = \lambda(\gamma).$$

Para um especificado valor de γ , o sistema $f(y, \lambda) = 0$ consiste de n equações para $n+1$ incógnitas (y, λ) . Se a parametrização é estabelecida por uma adicional equação escalar,

$$p(y, \lambda, \gamma) = 0,$$

pode-se reformular o sistema original, expressando-o como

$$F(y, \lambda, \gamma) = \begin{pmatrix} f(y, \lambda) \\ p(y, \lambda, \gamma) \end{pmatrix} = 0, \quad (2.12)$$

o qual é constituído de $n+1$ equações e $n+1$ incógnitas (y, λ) . A formulação geral da equação (2.12) inclui todos os tipos de parametrização. Um exemplo deste tipo de parametrização é arbitrar $p(\cdot)$ somente em função do parâmetro físico do modelo, λ . Neste caso, a resolução de (2.12) significa a resolução de $f(y, \lambda)$ para $\lambda = \lambda^{j+1}$.

Como o conjunto de equações (2.12) é constituído de $(n+1)$ equações e $(n+1)$ incógnitas, ele pode ser resolvido por métodos iterativos convencionais (por exemplo o método de Newton-Raphson.).

2.2.2.2 Parametrização do Comprimento de Arco

O comprimento de arco, s , pode ser usado para o propósito de parametrização da trajetória. Ou seja, é possível substituir γ por s . Neste caso, uma equação correspondente $p(y, \lambda, \gamma) = 0$ consiste na equação (2.4b) rescrita como:

$$0 := \sum_{i=1}^n (y_i - y_i(s_j))^2 + (\lambda - \lambda(s_j))^2 - (s - s_j)^2. \quad (2.13)$$

onde $s \in \mathbb{R}$. Se $(y', \lambda') = (y(s_j), \lambda(s_j))$ é a solução previamente calculada, a equação (2.13), juntamente com a equação (2.1), fixa uma solução $(y(s), \lambda(s))$ no comprimento de arco $\Delta s = s - s_j$ estipulado.

O novo conjunto de equações é expresso então como

$$F(y, \lambda, s) = \begin{pmatrix} f(y, \lambda) \\ p(y, \lambda, s) \end{pmatrix} = 0.$$

Esta parametrização faz de s uma aproximação para o comprimento de arco sobre a curva de solução.

2.2.2.3 Parametrização Local

Na parametrização local, qualquer dos componentes z_i ($i = 1, \dots, n+1$) com $z_i = y_i$ ($i=1, \dots, n$) e $z_{n+1} = \lambda$, pode ser admitido como um parâmetro matemático por uma ou mais iterações. A equação parametrizada é expressa como

$$p(z, \eta) = z_k - \eta,$$

com um índice k , $1 \leq k \leq n+1$, e um adequado valor de η . Este índice k e o parâmetro $\eta = z_k$ são especificados em cada etapa de correção. A equação (2.12) é reescrita como

$$F(z, \eta, k) = \begin{pmatrix} f(z) \\ z_k - \eta \end{pmatrix} = 0. \quad (2.14)$$

A determinação do índice k e do valor do parâmetro η pode ser feita com base nas equações (2.6) e (2.7) dos preditores tangente. Ou seja, k é tal que

$$|z_k| = \max \{ |dz_1|, \dots, |dz_n|, |dz_{n+1}| \} \quad (2.15)$$

Esta escolha seleciona o componente do vetor tangente dz que é máximo em termos de magnitude. No algoritmo de predição baseado no vetor secante, equação (2.9), o índice k é escolhido tal que $\Delta_r z_k$ é o máximo de todas variações relativas, isto é

$$\Delta_r z_k = \max \{ \Delta_r z_1, \dots, \Delta_r z_{n+1} \}, \quad (2.16)$$

com
$$\Delta_r z_i = \frac{|z_i^j - z_i^{j-1}|}{|z_i^j|}.$$

Depois que um índice k é fixado, um valor adequado para o parâmetro η deve ser determinado. O valor de η depende do índice k , da localização da solução corrente sobre o ramo (isto é, em j) e do desejado tamanho de passo σ .

2.2.2.4 Reformulação por Definição da Trajetória [Iba91]

Neste caso, define-se uma direção correspondente à trajetória desde a solução predita até a solução exata, esta é obtida como resultado final da fase de correção. Apesar de ser possível especificar qualquer direção, a análise geométrica do problema

revela que é razoável supor que a busca da solução corrigida deve ser feita numa direção ortogonal ao vetor tangente (ou secante) de predição. Assume-se que isto resulta no caminho de menor distância entre as duas soluções consideradas. Desde que o vetor tangente de predição é conhecido, a equação adicional pode ser expressa em termos de um produto escalar, onde as componentes do vetor apontando na direção perpendicular ao vetor tangente correspondem aos incrementos nas variáveis do problema linearizado. A vantagem desta estratégia é deixar estes incrementos com um certo grau de liberdade para variarem na direção selecionada. Ao contrário do artifício de parametrização, neste caso não há necessidade de se especificar o valor de um incremento, causa de eventuais problemas na fase de correção, conforme mencionado anteriormente.

2.2.2.5 Interpretação Gráfica

O ponto final (y^{j+1}, λ^{j+1}) alcançado na etapa corretora é influenciado fortemente pela equação $p(y, \lambda, \gamma) = 0$. A trajetória da solução aproximada à solução exata depende do tipo de parametrização e do método de resolução do sistema não linear. Diferentes parametrizações usualmente conduzem a diferentes pontos sobre a curva de soluções. Entretanto, o ponto (y^{j+1}, λ^{j+1}) limite da seqüência de soluções continuadas é suposto ser alcançado independentemente do tipo de parametrização, se um tamanho de passo conveniente é estabelecido. Entretanto, em geral poucas informações se possui sobre a relação entre y_i , λ e o comprimento de arco s , o que dificulta a especificação da magnitude do passo. A Figura 2.3 ilustra as trajetórias do ponto predito ao ponto corrigido, aplicando-se três tipos de parametrização: (a) via parâmetro λ (com tamanho do passo igual a $\Delta\lambda$), (b) a parametrização local (com magnitude de passo igual a Δy_k), e (c) pelo comprimento de arco (com magnitude de passo igual a Δs).

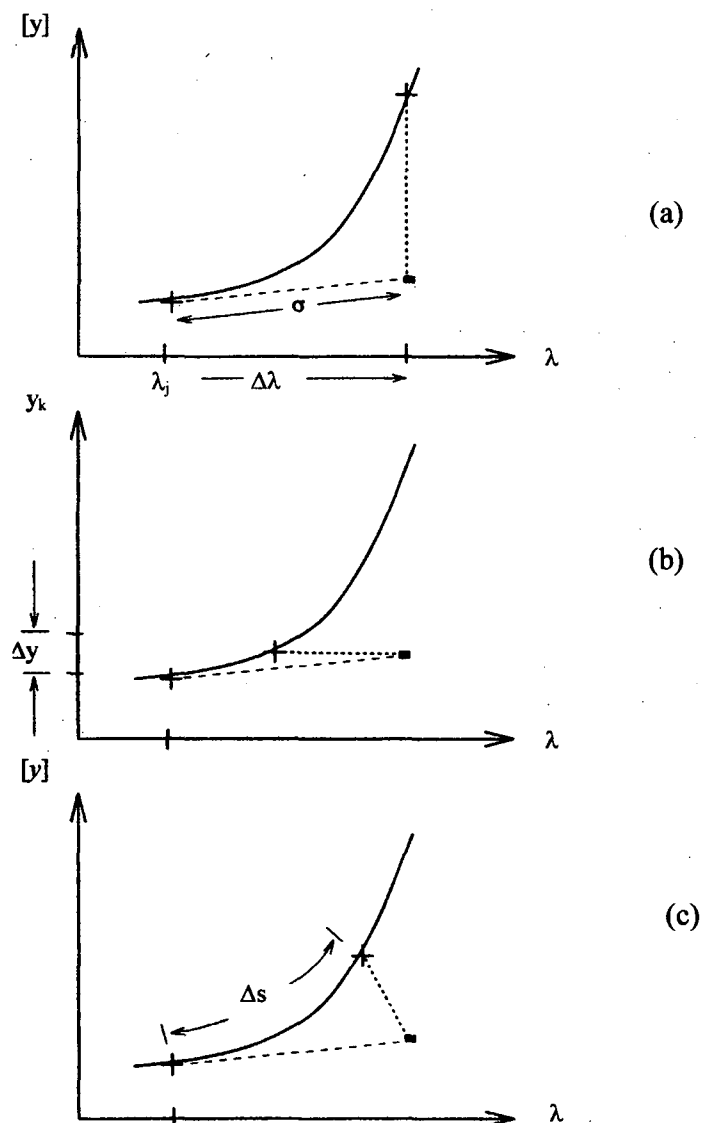


Figura 2.3. Diferentes trajetórias

As figuras 2.3a e 2.3b refletem a escolha de η , da equação (2.14), (e portanto de $\Delta\lambda$ ou Δy) coerente com o valor predito para a grandeza selecionada como parâmetro. Em outras palavras, η e o comprimento do passo do parâmetro escolhido são especificados com base no comprimento de passo predito. Na figura 2.3c, o ponto da curva alcançado com a correção depende da especificação do comprimento do arco. Porém, conforme citado anteriormente, as relações entre os comprimentos do arco s , do passo σ e Δy_k são mais difíceis de serem estabelecidas com precisão, o que pode diferenciar significativamente as soluções estimada e corrigida.

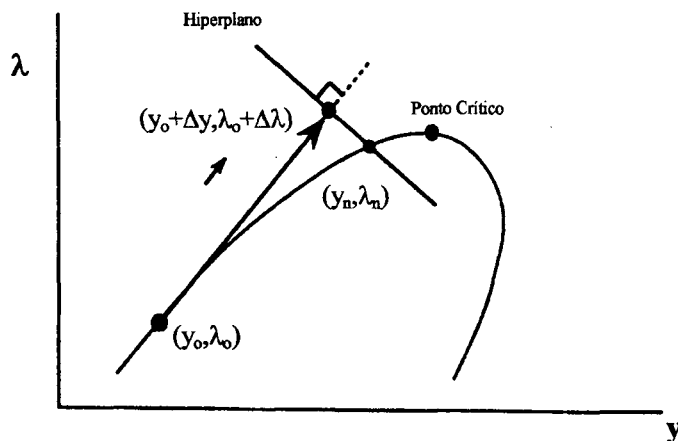


Figura 2.4. Gráfico ilustrando o conceito de hiperplano perpendicular

O gráfico da Figura 2.4 ilustra o conceito de reformulação das equações por definição de trajetória. Define-se um hiperplano ortogonal ao vetor tangente $(\Delta y, \Delta \lambda)$, que intercepta o vetor tangente no ponto $(y_0 + \Delta y, \lambda_0 + \Delta \lambda)$. Este hiperplano ortogonal irá interceptar a solução corrigida (y_n, λ_n) , sobre a curva de soluções.

2.2.3 Corretor

Após a fase de predição, onde é obtida uma aproximação da solução continuada, prossegue-se ao cálculo da solução exata. Este diz respeito a solução das equações não lineares, para um novo valor de λ , a partir da solução estimada. Em princípio, qualquer método numérico para resolver um conjunto de equações algébricas não lineares pode ser usado como corretor. Em geral, se o preditor fornecer uma solução aproximada de boa qualidade e a reformulação das equações não lineares é adequada, poucas iterações são suficientes para que o corretor encontre a solução exata com a precisão requerida.

Um passo da iteração de Newton, para o vetor de funções não lineares de dimensão $(n+1)$, é expresso como

$$f_y \Delta y + f_\lambda \Delta \lambda = -f(y^{(v)}, \lambda^{(v)}), \quad (2.17)$$

$$y^{(v+1)} = y^{(v)} + \Delta y, \quad \lambda^{(v+1)} = \lambda^{(v)} + \Delta \lambda.$$

Nesta equação, as derivadas parciais de primeira ordem são calculadas em $(y^{(v)}, \lambda^{(v)})$. O sistema de equações lineares na equação (2.17) consiste de n equações em $n+1$ incógnitas, Δy e $\Delta \lambda$, e portanto deve ser acrescido de uma equação. Se a trajetória da solução predita à solução corrigida é estabelecida como perpendicular ao vetor tangente da equação (2.6), a equação adicional pode ser expressa em termos de produto escalar ($n+1$), como

$$(\Delta y^T, \Delta \lambda) dz = 0. \quad (2.18)$$

Portanto, partindo do preditor,

$$(y^{(0)}, \lambda^{(0)}) = (\bar{y}^{j+1}, \bar{\lambda}^{j+1}),$$

as equações (2.17) e (2.18) definem uma seqüência de iterações corretoras $Y^{(v)}$

$$(y^{(v)}, \lambda^{(v)}), \quad v = 1, 2, \dots,$$

as quais convergem para uma solução (y^{j+1}, λ^{j+1}) . Esta seqüência eventualmente atinge o ramo numa solução que é a interseção da curva definida por $f(y, \lambda) = 0$ e o hiperplano definido pela equação (2.18). Deve ser ainda observado, que na equação (2.18) o vetor tangente dz pode ser substituído por outros vetores, de acordo com a direção da trajetória desejada.

2.2.4 Controle do Passo

Um dos fatores que mais tem efeito sobre a eficiência computacional do método da continuação é o controle do tamanho do passo [Chia95]. Em geral, é seguro especificar uma magnitude constante e reduzida. Entretanto, esta escolha pode freqüentemente conduzir a um esforço computacional elevado, com muitas etapas através da parte aproximadamente linear da curva de soluções. De maneira análoga, um passo de grande magnitude pode resultar num ponto predito demasiadamente distante da solução corrigida, resultando numa correção com um número elevado de iterações, ou mesmo na impossibilidade de se alcançar a solução corrigida. Idealmente, o comprimento do passo deveria adaptar-se à forma da curva de solução a ser traçada: um grande comprimento de passo seria usado na parte aproximadamente linear da curva de solução e um comprimento de passo pequeno na parte da curva com maior grau de curvatura. Entretanto, a forma da curva de solução não é conhecida previamente, dificultando assim a tarefa de controlar o tamanho do passo. Portanto, bons controladores de comprimento de passo são usualmente projetados para aplicações específicas.

Uma estratégia razoável para o controle do tamanho de passo, consiste em escolher um limite máximo, $h_{max,j}$, para cada variável y_j . O comprimento de passo corrente h ao longo do comprimento de arco s , é escolhido tal que

$$h \frac{dy_j}{ds} \leq h_{max,j}, \quad i = 1, \dots, n+1 \quad (2.19)$$

A razão para esta escolha é tirar proveito da informação de primeira ordem, sobre a dependência das variáveis envolvidas com o comprimento de arco, fornecida pela primeira derivada. Dependendo desta informação, para cada variável é atribuído um valor elevado de $h_{max,j}$ ao longo da parte “plana” da curva e um valor pequeno de $h_{max,j}$ para parte que possui curvatura mais acentuada. O sucesso deste método de controle de passo depende do valor apropriado de $h_{max,j}$ [Chia95].

Outro método simples para o controle da magnitude do passo consiste em observar o número de iterações requeridas em cada passo do processo iterativo de

correção. A partir de um número de iterações especificado previamente e considerado como satisfatório, compara-se o número de iterações real de cada etapa de correção com o especificado. Se o número real é menor, então o próximo comprimento de passo pode ser um pouco maior do que o anterior. Caso contrário, o próximo comprimento de passo deve ser um pouco menor do que o estipulado anteriormente. Apesar de simples, este método é susceptível a falha se alguma variável tem o seu limite violado, pois neste caso serão necessárias algumas iterações adicionais para alcançar a convergência. Dependendo da frequência desta ocorrência, a comparação referida poderá ser efetuada com dados equivocados, prejudicando a eficiência computacional do método.

2.3 CONCLUSÃO

O desenvolvimento analítico do Método da Continuação abordado neste capítulo, mostra a importância dos seus elementos básicos (predição, parametrização, correção e controle do tamanho do passo) no desempenho do método.

A predição afeta significativamente o número de iterações requeridas pelo corretor para obter uma solução exata, porque o ponto de partida na etapa de correção é a solução predita. A parametrização permite atingir diferentes pontos sobre a curva de soluções. A correção fornece a solução exata do conjunto de equações algébricas não lineares do problema em estudo.

O desempenho da metodologia para a determinação de uma sequência de soluções continuadas depende fortemente do fator de passo. Diferentes fatores de passo influenciam a eficiência do processo computacional, podendo mesmo conduzir ao risco de não convergência do processo iterativo na fase de correção. Fatores de passo muito reduzidos requerem demasiado esforço computacional no cálculo da trajetória de soluções. Valores muito grandes podem levar a um número de iterações elevado ou mesmo a uma situação de não convergência.

No próximo capítulo, é apresentado o desenvolvimento matemático do Método da Continuação aplicado a Sistemas de Potência nas diversas implementações encontradas na literatura.

CAPÍTULO 3

MÉTODO DA CONTINUAÇÃO APLICADO A SISTEMAS DE POTÊNCIA

3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, primeiramente descreve-se o problema de instabilidade de tensão, analisando as metodologias que melhor se adequam à compreensão e à solução de algumas questões relacionadas a esse fenômeno. Posteriormente, apresenta-se o desenvolvimento matemático do método da Continuação aplicado a sistemas de potência em regime permanente, em algumas das diversas formulações encontradas na literatura.

3.2 ASPECTOS GERAIS

Nos dias atuais, o aumento na demanda e a transferência de potência em níveis cada vez maiores, têm levado os operadores a uma preocupação crescente com a segurança e a qualidade de serviço dos sistemas de potência. Em alguns casos, o crescimento desordenado da demanda provocou em certos sistemas o aparecimento de um fenômeno chamado “colapso de tensão”. Muitos são os casos relatados na literatura de

tipos de ocorrência de instabilidade de tensão, com e sem o agravante do subsequente colapso de tensão [Tayl94]. Como cada vez mais, no que diz respeito à capacidade dos equipamentos, os sistemas de energia elétrica tendem a operar próximos de seus limites máximos, devido principalmente ao aumento desordenado da demanda dos sistemas e à falta de investimento na ampliação e manutenção dos sistemas existentes, os esforços em pesquisas aumentam, no sentido de entender este fenômeno, desenvolver metodologias de identificação e formulação do problema e definir medidas preventivas para evitá-lo e/ou corretivas para manter a qualidade da operação.

Além do crescimento da demanda, deve-se levar em conta a possível ocorrência de contingências não previstas durante a operação do sistema. Por exemplo, a saída inesperada de uma linha de transmissão causando sobrecarga em outras linhas. A insuficiência de meios para o transporte de energia elétrica entre a geração e uma demanda elevada tem ocasionado problemas de instabilidade de tensão, devido particularmente à falha no suprimento de potência reativa.

Para operar satisfatoriamente um sistema de energia elétrica, é necessário conhecer com precisão o limite máximo de carregamento do sistema e determinar os ajustes requeridos para estabelecer ou manter uma condição de funcionamento normal.

Por este motivo, o estudo da “instabilidade de tensão” adquiriu grande importância na área de sistemas de energia elétrica. Segundo a literatura, a instabilidade de tensão é “um progressivo e descontrolado declínio de tensões nas barras do sistema, provocado por um carregamento desordenado ou por uma contingência, atingindo em certos casos uma condição de equilíbrio cujos valores das magnitudes das tensões são inaceitáveis” [Barb97].

As equações que modelam os sistemas de potência em regime permanente são de natureza não-linear. Para certos tipos de equações não lineares, bifurcações do tipo sela-nó ocorrem freqüentemente e têm sido intensamente estudadas. Sob o ponto de vista estático, o problema de estabilidade de tensão tem sido abordado algumas vezes como um problema de bifurcação sela-nó [Iba91], [Ajja92], [Cañi93], [Cañi94], [Souz97]. Estas referências mostram que este tipo de problema tem maior probabilidade de ocorrer quando os sistemas operam em condições limite. Ou seja, próximos do seu carregamento máximo em termos de demanda. Sob este ponto de vista, o colapso de tensão tem sido associado a um ponto de bifurcação, para o qual a matriz Jacobiana do fluxo de carga é singular

[Souz94]. Como consequência, próximo ao ponto de bifurcação ou ponto crítico, há dificuldade em determinar uma solução para as equações do fluxo de potência.

A Figura 3.1 ilustra a conhecida curva PV, que representa a variação da magnitude da tensão numa barra em função da injeção de potência ativa. É possível observar nesta curva, que existem dois valores possíveis de tensão para cada valor de potência. Esses valores correspondem a duas regiões de operação definidas como: (i) a região normal ou de operação estável, onde a magnitude da tensão possui valores coerentes com aqueles efetivamente existentes na operação do sistema de potência. Nesta região, um aumento de demanda causa uma redução no nível de tensão; (ii) a região não normal ou de operação instável, onde a magnitude da tensão é reduzida, e uma elevação na demanda causa um aumento no nível de tensão. O ponto de bifurcação é considerado como o limite entre essas duas regiões.

Embora teoricamente seja possível o sistema operar na parte inferior da curva, isto não é levado a efeito na prática, pois para se produzir a potência necessária com uma tensão com valor reduzido seriam necessários altos valores de corrente, o que não é uma situação aconselhável e nem segura para operação do sistema.

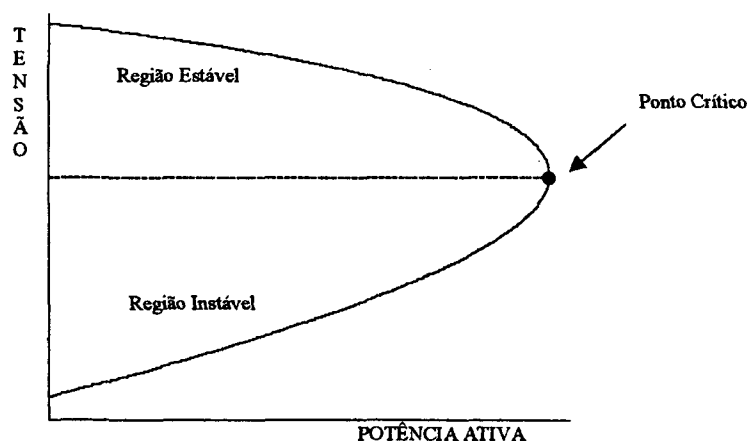


Figura 3.1. Gráfico mostrando as duas regiões de operação

3.3 O ESTUDO DA ESTABILIDADE DE TENSÃO

Dois tipos de abordagem podem ser classificados como básicos para a análise da estabilidade de tensão: a abordagem estática e a abordagem dinâmica. O fenômeno do colapso de tensão, que pode ocorrer em um período de tempo que varia de segundos a dezenas de minutos, possui um mecanismo essencialmente dinâmico [Lerm95]. Diversos trabalhos entretanto, são baseados nos aspectos estáticos do sistema de potência, justificando como frequentemente lenta a variação da tensão com o aumento de demanda ao longo do tempo.

Os métodos estáticos se baseiam em geral nas informações obtidas via estudo de fluxo de potência. A análise estática é capaz de fornecer medidas práticas da proximidade da estabilidade de tensão, além de indicar as áreas que potencialmente possuem problemas de estabilidade de tensão. Por sua vez, a abordagem dinâmica pode ser feita através da simulação não-linear no tempo ou através da análise modal. Em qualquer estudo, a precisão dos resultados será tanto maior quanto maior for o grau de detalhamento dos componentes do sistema [Lerm95].

O enfoque dinâmico de estabilidade de tensão não tem sido tão explorado quanto o enfoque estático, devido à complexidade exigida para a modelagem dos componentes do sistema de potência e ao tipo de algoritmo utilizado na solução das equações que representam o comportamento do modelo dinâmico. Embora se saiba que a característica do colapso de tensão é não-linear e dinâmica, um grande número de abordagens tem procurado fazer uso de técnicas de análise numérica convenientes aos modelos estáticos.

Sob certas condições, as equações de fluxo de potência podem ser usadas para modelar o sistema de potência nos estudos de estabilidade de tensão. Desde que estas equações são relativamente simples, a sua manipulação é muitas vezes preferida, devido ao menor tempo computacional em geral associado aos processos de cálculo numérico. Por outro lado, essas equações são limitadas no que diz respeito à modelagem dos componentes do sistema. Em certas circunstâncias, até mesmo a convencional representação da carga por injeções de potência constante é questionável. Apesar disto, este tipo de abordagem foi um dos primeiros a servir de base no estudo do referido

problema, e continua sendo intensamente pesquisado. Basicamente, os métodos chamados estáticos procuram verificar até que ponto o conjunto de equações algébricas que descreve o fluxo de potência nas linhas possui solução. O ponto onde a matriz Jacobiana do fluxo de potência Newton-Raphson convencional é singular é suposto fornecer a condição limite em termos de carga do sistema.

3.3.1 Análise Estática

- ♦ A base dos métodos que utilizam o modelo estático para a rede elétrica são as informações obtidas via estudo de fluxo de potência convencional. A análise estática pode fornecer medidas úteis da proximidade da instabilidade de tensão, além de indicar as áreas que potencialmente possuem problemas de estabilidade de tensão. Este tipo de metodologia requer uma representação não muito detalhada do sistema a ser analisado, o que constitui uma de suas principais vantagens. Dentre as várias abordagens encontradas na literatura específica para a determinação do máximo carregamento de um sistema de energia elétrica, algumas das principais são:
- ♦ baseadas na determinação de múltiplas soluções [Tamu83],[Iba90];
- ♦ baseadas em estimativas aproximadas das condições de máximo carregamento [Zeng93];
- ♦ baseadas na análise de sensibilidade [Flat90], [Van91], [Ajja94];
- ♦ baseadas em técnicas de otimização estática [Iris96];
- ♦ baseadas na técnica do mínimo valor singular [Tira88];
- ♦ baseadas nas técnicas utilizando autovalores [Gao92], [Cañi96];
- ♦ baseadas em métodos diretos [Cañi93] e
- ♦ baseadas no Método da Continuação [Iba91], [Ajja92], [Cañi93].

A maior parte das metodologias estáticas citadas na literatura se enquadra nas classes citadas acima. A seguir são resumidos os principais aspectos de cada abordagem.

As abordagens que utilizam as **soluções múltiplas** das equações da rede elétrica visam determinar as soluções distintas correspondentes a um mesmo nível de carga. É suposto: a) que as duas soluções de níveis diferentes de tensão estão geometricamente dispostas ao longo de uma linha reta, e b) que um ponto de singularidade da matriz Jacobiana do fluxo de carga se situa ao longo da linha que passa pelo ponto médio entre as duas soluções [Yori96]. O método de Newton-Raphson em coordenadas retangulares é considerado mais adequado para esta finalidade [Iba90]. A proximidade entre as soluções do fluxo de potência serve como um indicador de instabilidade de tensão.

A abordagem que utiliza uma **estimativa aproximada das condições de máximo carregamento** também é baseada na solução do fluxo de carga convencional. Calcula-se, neste caso, a máxima quantidade de carga incremental que o sistema pode tolerar ao longo de uma direção especificada, bem como o correspondente vetor de tensões [Zeng93]. A maior vantagem desta metodologia é a sua simplicidade. Fundamentalmente, obtém-se um mínimo de cinco soluções do fluxo de potência, a partir das quais se estabelece uma equação escalar não linear, resolvida pelo método de Newton. A solução desta fornece o fator incremental de carga máximo e os elementos necessários para a estimativa das tensões complexas no ponto crítico.

Estudos que aplicam a **análise de sensibilidade** buscam a determinação de uma relação (em geral linearizada) entre as variáveis e o carregamento do sistema de potência. Com base nesta relação, é possível indicar quais os dispositivos fornecedores de potência reativa que tendem a operar no limite e quais as áreas que estão mais sujeitas ao colapso de tensão por falta de suporte de reativo [Ajja94]. É possível combinar metodologias que exploram ambos, o método da continuação e as relações de sensibilidade no estudo do suporte de reativo para a prevenção do colapso de tensão.

O estudo da estabilidade de tensão em regime permanente pode também ser realizado através de metodologias baseadas na aplicação de **técnicas de otimização estática**. Dois problemas relevantes podem ser resolvidos via essas técnicas. O primeiro consiste em maximizar a carga total do sistema respeitando-se as restrições de balanço de potência na rede e os limites operacionais. O segundo diz respeito a determinação da quantidade ótima de carga a ser suprimida quando as equações do fluxo de potência não convergem. A inclusão de qualquer tipo de restrição formulada com base na operação em regime permanente pode ser vista como a principal vantagem deste tipo de abordagem. A

literatura reporta que o problema de otimização não linear pode ser resolvido satisfatoriamente através do Método Primal-Dual dos Pontos Interiores [Iris96].

Os métodos baseados na análise do **mínimo valor singular** determinam pontos de operação próximos àquele onde ocorre a bifurcação estática. Nestes pontos, a matriz Jacobiana do fluxo de potência convencional tende à singularidade, o que implica em que o seu mínimo valor singular tende a zero. A singularidade da matriz Jacobiana indica que não existe solução viável para as equações do fluxo de potência, o que pode caracterizar o colapso de tensão. Os vetores singulares esquerdo e direito, associados ao mínimo valor singular, são usados para obtenção de informações sobre quais áreas e barras são as mais críticas em relação a problemas de instabilidade de tensão [Lemo94].

Estudos baseados no cálculo dos **autovalores** visam associar um número específico de autovalores da matriz Jacobiana do fluxo de potência aos modos da variação de tensão/potência reativa. O objetivo é fornecer uma medida relativa da proximidade da instabilidade de tensão, sendo a análise efetuada geralmente em áreas sujeitas à esta instabilidade [Lerm95]. Essa abordagem fundamenta-se no fato de que no ponto de bifurcação a Jacobiana tem um único autovalor zero. Entretanto, o cálculo dos autovalores é requerido para cada ponto de operação, o que pode demandar demasiado esforço computacional.

Abordagens baseadas nos **métodos diretos** têm por objetivo calcular de forma direta o ponto limite de carregamento através da solução de um sistema não linear modificado, onde uma das equações representa a condição de singularidade da matriz Jacobiana no ponto crítico. Apesar de bem definido analiticamente, este sistema é de difícil solução, a convergência do processo iterativo dependendo entre outros fatores de uma boa condição inicial.

As abordagens baseadas nos **métodos da continuação** visam calcular uma sequência de soluções do sistema não linear desde um ponto inicial (correspondente a um especificado nível de demanda) até um ponto crítico (correspondente ao máximo carregamento do sistema em termos de demanda), a partir do qual esse sistema de equações é de difícil solução devido ao fato da matriz Jacobiana tender a singularidade neste ponto. Basicamente a demanda do sistema é parametrizada, o que constitui a principal modificação nas equações de balanço de potência do sistema. O Método da Continuação gera uma sucessão de soluções, variando automaticamente o parâmetro de

carga, até que o ponto de bifurcação estática é encontrado. A descrição detalhada da aplicação do Método da Continuação é feita na seção seguinte.

3.4 O MÉTODO DA CONTINUAÇÃO

Diversas formulações da aplicação do método da continuação a problemas de determinação do ponto de demanda máxima podem ser encontradas na literatura [Iba91], [Ajja92], [Cañi93], [Cañi94], [Chia95]. Nas seções a seguir são mostradas formulações do Método da Continuação em termos das variáveis do sistema de potência.

3.4.1 Formulação em Coordenadas Polares

No período mais recente, uma das primeiras versões do Método da Continuação aplicado ao estudo do problema de estabilidade de tensão foi aquela apresentada na referência [Iba91]. O modelo analítico de carga adotado nesta abordagem é definido pela equação (3.1).

$$Ys(\lambda) = Yso + \lambda Yd \quad (3.1)$$

$$Yd = (\Delta P^g, \Delta P^d, \Delta Q^d)^T$$

onde Yso é a carga base especificada, Yd é o modelo incremental de carga selecionado a priori, e λ é um fator de parametrização.

A equação (3.1) modela a carga como linear em λ , com um valor de carga base Yso . O fator λ faz com que a demanda siga numa direção arbitrária definida por Yd .

As equações de balanço de potência num sistema de geração/transmissão podem ser escritas como

$$f(y) = 0$$

onde y é o vetor composto pelas variáveis δ e V . Substituindo a expressão (3.1) nas equações do balanço de potência, obtém-se

$$\begin{aligned} f(y, \lambda) &= f(y_0) - Ys(\lambda) \\ &= f(y_0) - (Ys_0 + \lambda Yd) = 0 \end{aligned} \quad (3.2)$$

A solução de $f(y, \lambda) = 0$ fornece a solução do fluxo de carga para o valor especificado de $Ys(\lambda)$. Para estimar uma solução $(y_0 + \Delta y, \lambda_0 + \Delta \lambda)$ a partir de uma solução conhecida (y_0, λ_0) , utiliza-se a relação linearizada entre Δy e $\Delta \lambda$, obtida através da expansão das equações (3.2) em Série de Taylor e expressa por

$$J\Delta y - Yd\Delta \lambda = 0 \quad (3.3)$$

onde J é a matriz Jacobiana usada no problema de fluxo de potência convencional.

Na etapa de predição o vetor Δy e o escalar $\Delta \lambda$ são normalizados segundo as equações (3.4) ou (3.5).

$$\Delta \lambda^2 + \sum_i \Delta y_i^2 = K \quad (3.4)$$

$$\sum_i \Delta y_i^2 = K \quad (3.5)$$

O sistema formado pelas equações (3.3) e (3.4) ou (3.5) pode ser então resolvido, obtendo-se os valores de Δy e $\Delta \lambda$, que definem o vetor tangente às trajetórias de soluções.

Essas equações funcionam como um tipo de função de escalonamento. Visa-se com o seu uso determinar um incremento $\Delta \lambda$ conveniente durante o processo iterativo. Quanto mais próxima a solução estiver do ponto crítico, mais reduzido se torna $\Delta \lambda$.

O valor de K é selecionado de acordo com a estrutura e o tamanho do sistema, para limitar o comprimento do vetor $(\Delta y, \Delta \lambda)$. Este valor influencia a performance da metodologia em questão, pois o mesmo está relacionado à distância entre duas soluções do fluxo de potência obtidas na fase de correção.

A solução exata (y_n, λ_n) obtida a partir de $(y_0 + \Delta y, \lambda_0 + \Delta \lambda)$ na fase de correção é calculada resolvendo-se a equação (3.6).

$$f(y_n, \lambda_n) = 0 \quad (3.6)$$

$$\Delta\lambda[\lambda_n - (\lambda_0 + \Delta\lambda)] + \sum_i \Delta y_i [y_{n_i} - (y_{0_i} + \Delta y_i)] = 0$$

A segunda linha da equação (3.6) define um hiperplano perpendicular ao vetor tangente $(\Delta y, \Delta\lambda)$, e intercepta o ponto $(y_0 + \Delta y, \lambda_0 + \Delta\lambda)$, o qual representa a solução corrigida.

A equação (3.6) é resolvida pelo método de Newton-Raphson. A dimensão da matriz Jacobiana deste problema é maior que a do fluxo de potência convencional em uma linha/coluna, conforme mostrado na equação (3.7). Nota-se que somente y_n e λ_n são variáveis neste problema, tendo sido os valores de y_0 , λ_0 , Δy e $\Delta\lambda$ obtidos previamente.

$$J_h = \begin{bmatrix} \mathbf{J}(y) & -Yd \\ \Delta y & \Delta\lambda \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Além do ponto de máximo carregamento, o traçado completo da curva P-V pode ser feito combinando-se o Método da Continuação com o algoritmo de determinação de múltiplas soluções proposto em [Iba89]. A parte superior da curva P-V é obtida resolvendo-se as equações de fluxo de carga, durante a aplicação do Método da Continuação, e a parte inferior da curva é determinada aplicando-se a técnica descrita em [Iba89].

O procedimento proposto na abordagem considerada pode ser resumido nos seguintes passos:

- (i) Resolver o problema de fluxo potência para uma carga base através do algoritmo convencional de Newton-Raphson, com $\lambda = 0$. O resultado é o vetor y ;
- (ii) Especificar o incremento de carga Yd e um valor apropriado para o parâmetro K ;

- (iii) Calcular Δy e $\Delta \lambda$ usando a equação (3.8). Assumindo $\Delta \lambda=1$, Δy é obtido após o cálculo de Δz . Considerando o valor de S , escolhido de acordo com a equação utilizada, (3.4) ou (3.5), o fator escalar “ a ” é obtido. O vetor Δy e o escalar $\Delta \lambda$ são calculados utilizando-se as seguintes equações:

$$\begin{aligned} \Delta z &= \mathbf{J}^{-1} \mathbf{Y} d \\ \Delta y &= \Delta z \cdot a \\ \Delta \lambda &= a \end{aligned} \quad \begin{aligned} a &= \sqrt{\frac{K}{S + \sum_i \Delta z_i^2}} \\ S &= 1: \text{ para eq. (3.4)} \\ S &= 0: \text{ para eq. (3.5)} \end{aligned} \quad (3.8)$$

- (iv) Resolver a equação (3.6) pelo método de Newton-Raphson. A solução exata é obtida (etapa de correção); neste passo são obtidos y e λ ($y \leftarrow y_n$, $\lambda \leftarrow \lambda_n$) atualizados;
- (v) Se $|\lambda - \lambda_n| / \lambda > \epsilon$, retornar ao passo (iii). Caso contrário, o ponto final $Y_s(\lambda)$ é a solução correspondente à carga crítica.

Na abordagem proposta por Ajjarapu *et al* [Ajja92], as etapas de predição e correção são baseadas na técnica de parametrização local descrita no capítulo anterior. O objetivo do uso desta técnica é melhorar o condicionamento numérico da matriz Jacobiana através da reformulação do conjunto de equações de fluxo de potência. Da mesma maneira que na metodologia descrita anteriormente, as equações do fluxo de potência são reformuladas para incluir um parâmetro de carga λ , definido sob a condição

$$0 \leq \lambda \leq \lambda_{\text{crítico}}$$

onde $\lambda = 0$ corresponde ao caso base e $\lambda = \lambda_{\text{crítico}}$ à carga crítica.

Esta inclusão resulta nas equações de fluxo de potência modificadas expressas como

$$(P_j^s + \lambda \Delta P_j^s) - (P_j^d + \lambda \Delta P_j^d) - P_j(y) = 0$$

para as barras PV e PQ

$$Q_j^s - (Q_j^d + \lambda \Delta Q_j^d) - Q_j(y) = 0$$

para as barras PQ

onde P_j^g e Q_j^g denotam as gerações de potência ativa e reativa especificadas na barra j ; P_j^d e Q_j^d são as demandas de potência ativa e reativa especificadas na barra j para o caso base; ΔP_j^g , ΔP_j^d e ΔQ_j^d representam os incrementos de geração de potência ativa, e demandas de potência ativa e reativa, respectivamente, todos na barra j ; e y é o vetor de variáveis de estado do sistema (ângulo das tensões nas barras PV e PQ e a magnitude das tensões nas barras PQ). Na forma compacta estas equações podem ser escritas como

$$f(y, \lambda) = 0 \quad (3.9)$$

Deve ser observado que a equação (3.9) é semelhante à equação (2.1), apresentada no capítulo anterior. O vetor y é expresso como $y = [\delta, V]^r$, onde δ representa o vetor ângulo das tensões nas barras e V representa o vetor magnitude das tensões nas barras. Em geral, a dimensão de f será $2n_{pq} + n_{pv}$, onde n_{pq} e n_{pv} são os números de barras PQ e PV, respectivamente.

Conforme visto anteriormente, o processo iterativo é iniciado obtendo-se uma solução para um caso base do fluxo de carga. Para se determinar a solução subsequente, correspondente a outro nível de carga, utiliza-se o esquema preditor-corretor.

Uma vez determinada a solução base (y_0, λ) de $f(y, \lambda) = 0$, calcula-se uma seqüência de soluções, (y_1, λ_1) , (y_2, λ_2) ,..... até se atingir o ponto crítico ou de máxima demanda. A predição da próxima solução é feita selecionando a magnitude do incremento das variáveis numa direção pré-definida. A referência [Ajja92] utiliza a direção apontada pelo vetor tangente, pois esta é calculada de forma simples e fornece uma boa aproximação linear para os incrementos nas variáveis.

Substituindo-se $y = [\delta, V]^r$ na equação (3.9) e derivando-se a expressão resultante, obtém-se

$$df = \frac{\partial f}{\partial \delta} d\delta + \frac{\partial f}{\partial V} dV + \frac{\partial f}{\partial \lambda} d\lambda = 0 \quad (3.10)$$

ou na forma matricial

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial \delta} & \frac{\partial f}{\partial V} & \frac{\partial f}{\partial \lambda} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\delta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} = 0 \quad (3.11)$$

A matriz do lado esquerdo da equação (3.11) é a matriz Jacobiana do fluxo de carga convencional aumentada por uma coluna ($\partial f / \partial \lambda$). Uma variável adicional foi incluída nas equações do fluxo de potência convencional, porém o número de equações permaneceu o mesmo. Para se obter uma única solução para este sistema, uma equação adicional é necessária. Segundo o esquema de parametrização local, esta equação é expressa analiticamente especificando-se um valor não nulo para um dos componentes do vetor tangente, ou seja,

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial \delta} & \frac{\partial f}{\partial V} & \frac{\partial f}{\partial \lambda} \\ e_k \end{bmatrix} [dz] = \begin{bmatrix} 0 \\ \pm 1 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

onde e_k é um vetor linha com todos elementos iguais a zero, exceto o elemento da posição k , o qual é unitário; e dz é o vetor tangente. A escolha adequada do índice k melhora o condicionamento numérico da matriz Jacobiana no ponto crítico [Ajja92]. O uso do sinal ± 1 depende da evolução da variável k no processo. Se a magnitude desta variável estiver crescendo, $+1$ deverá ser usado, e se estiver decrescendo, -1 deverá ser usado.

A estratégia utilizada por Ajarapu *et al* [Ajja92] para a escolha do índice k é a seguinte: a variável de estado de maior magnitude no vetor tangente corresponderá ao parâmetro da continuação. Inicialmente o parâmetro de carga λ é escolhido, sendo essa escolha reavaliada em cada passo. Analiticamente este artifício é expresso como

$$k : z_k = \max \{ |dz_1|, |dz_2|, \dots, |dz_m| \} \quad (3.13)$$

onde dz é o vetor tangente com a dimensão de $m = 2n_{pq} + n_{pv} + 1$ e o índice k corresponde ao componente do vetor tangente que é máximo em magnitude.

A análise dos componentes do vetor tangente de predição permite identificar as áreas críticas, e estabelecer índices que permitem detectar a proximidade ao ponto crítico. Os elementos do vetor tangente são relações de sensibilidade, indicando como se modificam as variáveis de estado do sistema em função das modificações no nível de carregamento.

Uma vez calculado o vetor tangente, a solução predita é definida da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \delta^* \\ V^* \\ \lambda^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta \\ V \\ \lambda \end{bmatrix} + \sigma [dz] \quad (3.14)$$

onde “*” indica a solução predita, σ é o escalar denominado *fator de passo*. O fator de passo deve ser escolhido de forma que a solução predita esteja situada no raio de convergência do corretor. A questão sobre a magnitude deste fator a ser especificada, conforme mencionado na seção 2.2.4, está relacionada tanto a rapidez com que se atinge o ponto crítico quanto a confiabilidade da convergência do processo iterativo na etapa de correção. Fatores de passo reduzidos demais não são interessantes devido ao tempo gasto no cálculo da trajetória das soluções de fluxo de carga, e valores elevados podem dificultar a convergência do corretor, podendo causar até mesmo problemas de divergência.

Após a etapa de predição, a correção da solução aproximada é necessária. Para esta finalidade, é necessária uma reformulação das equações não lineares, de acordo com o exposto no capítulo anterior. Conforme mencionado anteriormente, a reformulação utilizada por Ajjarapu *et al* [Ajja92] consiste na parametrização local da forma descrita na seção 2.2.2.3. Assim, a parametrização é feita da seguinte forma: o conjunto de equações é aumentado de uma equação, a qual especifica o valor de uma das variáveis dependentes (no caso, δ , V ou λ). Analiticamente isto pode ser expresso como

$$z = \begin{bmatrix} \delta \\ V \\ \lambda \end{bmatrix} \quad z \in \mathbb{R}^m \quad e \quad z_k = \eta \quad (3.15)$$

onde η é o valor especificado para o k -ésimo elemento de z . O conjunto de equações não lineares a ser resolvido na etapa de correção será portanto

$$\begin{bmatrix} f(z) \\ z_k - \eta \end{bmatrix} = [0] \quad (3.16)$$

Após a reformulação do sistema de equações não lineares, o método de Newton-Raphson pode ser usado para se obter a solução deste conjunto de equações. O índice k , da variável cujo valor é especificado na fase de correção, é o mesmo usado na etapa de predição, e portanto a magnitude de η será igual a z_k^* , o valor predito de z_k . A variável de estado z_k é chamada *parâmetro da continuação*.

Resumindo: no preditor o parâmetro da continuação é ajustado para ter uma variação incremental não-nula (componente do vetor tangente igual a ± 1), e no corretor este valor é especificado igual a η , de modo que os valores das outras variáveis de estado possam ser encontrados.

Como critério de parada para o método utiliza-se o sinal da componente $d\lambda$ do vetor tangente. Esta componente, é nula no ponto crítico e é negativa além do ponto crítico. Assim, a verificação do sinal da componente $d\lambda$ do vetor tangente na etapa de predição revelará se o ponto crítico foi ultrapassado ou não.

Uma outra versão do Método da Continuação aplicado a sistemas de potência é apresentada por Cañizares *et al* em [Cañi93]. A estratégia de predição utilizada é aquela descrita na seção 2.2.1.3. Nesta etapa arbitra-se um valor para $\Delta\lambda$. O vetor de incrementos nas variáveis e a magnitude do passo são obtidos da normalização do vetor tangente, equação (2.11), rescrita como

$$\Delta\lambda = \frac{k}{\|dy/d\lambda\|}$$

$$\Delta y = \Delta\lambda \frac{dy}{d\lambda}$$

Nesta equação, o valor de k é calculado da seguinte forma

$$k = \sqrt{n_g}$$

onde n_g é o número de geradores do sistema. Esta escolha não afeta a localização do ponto crítico, mas influencia o desempenho do método.

O cálculo do vetor tangente não representa um grande custo computacional, pois a matriz Jacobiana é disponível na forma fatorada após a solução de cada fluxo de potência. Entretanto, quando o sistema se aproxima do ponto de bifurcação a matriz Jacobiana se torna mal-condicionada numericamente. Para contornar este problema, as técnicas de parametrização descritas no capítulo anterior podem ser usadas. O esquema de parametrização utilizado por Cañizares *et al* [Cañi93] é a parametrização local descrita anteriormente. A partir deste ponto, λ torna-se uma variável do sistema e z_k torna-se o novo parâmetro p . Analiticamente isto pode ser expresso como

$$p \leftarrow \max \left\{ \left| \frac{\Delta y_1}{y_1} \right|, \left| \frac{\Delta y_2}{y_2} \right|, \dots, \left| \frac{\Delta y_n}{y_n} \right|, \left| \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \right| \right\}.$$

O esquema de correção é o mesmo proposto por Iba *et al* [Iba91], o qual utiliza o conceito de hiperplano perpendicular ao vetor tangente de predição, na busca da solução exata para as equações do sistema. O ponto inicial para etapa de correção é a solução do passo preditor. Resolvendo-se o sistema de equações (3.6) obtém-se a solução corrigida. A primeira parcela em (3.6) representa as equações de balanço de potência. A segunda equação é relativa à condição de ortogonalidade entre o vetor tangente e a direção da trajetória da solução aproximada à solução exata.

3.4.1.1 Exemplo 1 - Formulação em Coordenadas Polares

Para ilustrar a teoria descrita nas subseções anteriores, apresenta-se um exemplo usando duas abordagens diferentes, formulado em coordenadas polares. Na primeira abordagem, a reformulação do conjunto de equações de fluxo de potência para a fase de correção, consiste em aumentar o mesmo com uma equação especificando o valor de uma das variáveis do problema. Esta é referenciada como **Abordagem “A”**. A segunda estratégia, reformula as equações não lineares adicionando a equação que representa a condição de ortogonalidade mencionada na subseção anterior. Esta é referida como

Abordagem “B”. Em ambos os casos, aumentou-se uniformemente toda a carga do sistema e a geração de potência ativa.

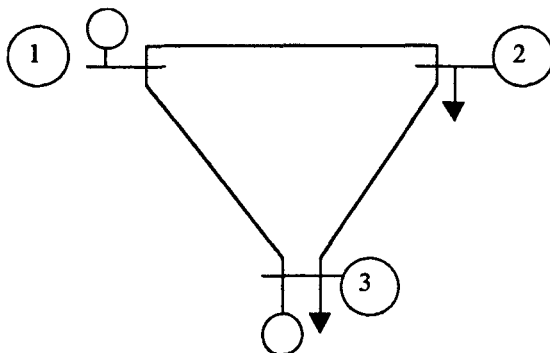


Figura 3.2. Diagrama unifilar para o sistema de 3 barras

O sistema exemplo [Mont83], da Figura 3.2, é composto por três barras e três linhas, e os dados, em p.u. estão nas tabelas a seguir:

Barra	Tipo	P_g	Q_g	P_d	Q_d	V	θ
1	V θ	–	–	–	–	1.00	0.0
2	PQ	–	–	0.05	0.02	–	–
3	PV	0.50	–	0.65	–	0.98	–

Tabela 3.1. Dados de Barra

Linha	r	x	b^{sh}
1-2	0.10	1.00	0.01
1-3	0.20	2.00	0.02
2-3	0.10	1.00	0.01

Tabela 3.2. Dados de linha

A solução do caso base (fluxo de potência convencional utilizando Newton-Raphson) está apresentada na Tabela 3.3 abaixo.

Barra	Tipo	V (p.u.)	θ (°)	P_g (MW)	Q_g (Mvar)	P_d (MW)	Q_d (Mvar)
1	V θ	1.00	0.0	20.33	-0.86	–	–
2	PQ	0.9828	-6.60	–	–	5.00	2.00
3	PV	0.98	-10.36	50.00	-1.63	65.00	–

Tabela 3.3. Solução do fluxo de carga

As equações da rede elétrica para este sistema de três barras, parametrizadas por λ são:

$$\begin{aligned} (P_2^g + \lambda \Delta P_2^g) - (P_2^d + \lambda \Delta P_2^d) - P_2(\mathbf{y}) &= 0 \\ (P_3^g + \lambda \Delta P_3^g) - (P_3^d + \lambda \Delta P_3^d) - P_3(\mathbf{y}) &= 0 \\ Q_2^g - (Q_2^d + \lambda \Delta Q_2^d) - Q_2(\mathbf{y}) &= 0 \end{aligned} \quad (3.17)$$

onde

$$P_2 = V_2[V_1(G_{21} \cos \theta_{21} + B_{21} \sin \theta_{21}) + V_3(G_{23} \cos \theta_{23} + B_{23} \sin \theta_{23})]$$

$$P_3 = V_3[V_1(G_{31} \cos \theta_{31} + B_{31} \sin \theta_{31}) + V_2(G_{32} \cos \theta_{32} + B_{32} \sin \theta_{32})]$$

$$Q_2 = V_2[V_1(G_{21} \sin \theta_{21} - B_{21} \cos \theta_{21}) + V_3(G_{23} \sin \theta_{23} - B_{23} \cos \theta_{23})]$$

onde os termos G e B correspondem aos elementos da matriz admitância de barra, Y_{barra} ,

ΔP_2^d , ΔP_3^d , ΔQ_2^d , ΔP_2^g e ΔP_3^g são calculados da seguinte forma

$$\Delta P_i^d = 0,025 P_{i0}^d$$

$$\Delta Q_i^d = 0,025 Q_{i0}^d$$

$$\Delta P_i^g = 0,025 P_{i0}^g$$

onde P_{i0}^d , Q_{i0}^d e P_{i0}^g , são as demandas de potência ativa, demandas de potência reativa e geração de potência ativa original das barras no sistema, respectivamente. Portanto, a taxa de variação na carga e na geração de potência ativa é de 2,5%.

O sistema de equações lineares para a determinação do vetor tangente, para as duas abordagens é dado por

$$-\begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_2}{\partial \theta_3} & \frac{\partial P_2}{\partial V_2} & -\Delta P_2^d \\ \frac{\partial P_3}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_3}{\partial \theta_3} & \frac{\partial P_3}{\partial V_2} & \Delta P_3^g - \Delta P_3^d \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial \theta_3} & \frac{\partial Q_2}{\partial V_2} & -\Delta Q_2^d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_2 \\ \Delta \theta_3 \\ \Delta V_2 \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

onde

$$\frac{\partial P_2}{\partial \theta_2} = V_2 (G_{21} \text{sen } \theta_2 - B_{21} \text{cos } \theta_2) + V_2 V_3 (G_{23} \text{sen } \theta_{23} - B_{23} \text{cos } \theta_{23})$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial \theta_3} = V_2 V_3 (B_{23} \text{cos } \theta_{23} - G_{23} \text{sen } \theta_{23})$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial V_2} = -(G_{21} \text{cos } \theta_2 + B_{21} \text{sen } \theta_2) - V_3 (G_{23} \text{cos } \theta_{23} + B_{23} \text{sen } \theta_{23})$$

$$\frac{\partial P_3}{\partial \theta_2} = V_2 V_3 (G_{32} \text{sen } \theta_{23} + B_{32} \text{cos } \theta_{23})$$

$$\frac{\partial P_3}{\partial \theta_3} = V_3 [(G_{31} \text{sen } \theta_3 - B_{31} \text{cos } \theta_3) - V_2 (G_{32} \text{sen } \theta_{23} + B_{32} \text{cos } \theta_{23})]$$

$$\frac{\partial P_3}{\partial V_2} = V_3 (B_{32} \text{sen } \theta_{23} - G_{32} \text{cos } \theta_{23})$$

$$\frac{\partial Q_2}{\partial \theta_2} = -V_2 (G_{21} \text{cos } \theta_2 + B_{21} \text{sen } \theta_2) + V_3 (G_{23} \text{cos } \theta_{23} + B_{23} \text{sen } \theta_{23})$$

$$\frac{\partial Q_2}{\partial \theta_3} = V_2 V_3 (G_{23} \text{cos } \theta_{23} + B_{23} \text{sen } \theta_{23})$$

$$\frac{\partial Q_2}{\partial V_2} = (B_{21} \text{cos } \theta_2 - G_{21} \text{sen } \theta_2) + V_3 (B_{23} \text{cos } \theta_{23} - G_{23} \text{sen } \theta_{23})$$

Os resultados obtidos pelas duas abordagens são descritos a seguir.

3.4.1.1.1 Abordagem “A”

O sistema de equações lineares para a determinação do vetor tangente para a primeira iteração do método da Continuação, utilizando a abordagem “A”, com os dados do caso base convergido, é dado por

$$\begin{bmatrix} 1.9131 & -0.9578 & 0.1437 & 0.00125 \\ -0.9453 & 1.4138 & -0.1604 & 0.00375 \\ -0.2412 & 0.0327 & 1.9061 & 0.0005 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta_2 \\ \Delta\theta_3 \\ \Delta V_2 \\ \Delta\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Na predição do primeiro ponto a última linha da matriz $[J_{aum}]$ tem o componente não nulo com valor 1, posicionado na última coluna, pois inicialmente λ é o parâmetro da continuação. Nas iterações seguintes, a determinação do parâmetro da continuação é feita observando-se a posição do maior elemento em módulo, do vetor tangente. O elemento não nulo do vetor do lado direito de (3.19) é fixado no valor 1, quando λ for o parâmetro da continuação, e em 0,005 quando o referido parâmetro for qualquer outra variável do sistema. Deve ser observado que poderia ter sido atribuído qualquer outro valor a este parâmetro. A solução deste sistema (3.19) fornece o seguinte vetor tangente

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta_2 \\ \Delta\theta_3 \\ \Delta V_2 \\ \Delta\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.0030 \\ -0.0047 \\ -0.0006 \\ 1.0000 \end{bmatrix}$$

Antes do ponto predito ser corrigido, o parâmetro da continuação para a próxima iteração deve ser determinado. Assim, como estabelecido em (3.13), o maior elemento do vetor tangente corresponde a $\Delta\lambda$, e então λ será o parâmetro da continuação para a próxima iteração. Utilizando a equação (3.14), atualizam-se os valores iniciais e obtém-se os valores preditos da primeira iteração,

$$\begin{bmatrix} \theta_2 \\ \theta_3 \\ V_2 \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.1182 \\ -0.1855 \\ 0.9822 \\ 1.0000 \end{bmatrix}$$

Devido à magnitude reduzida dos componentes do vetor tangente, a solução predita tem razoável precisão. Isto é, não são necessárias iterações na etapa de correção, pois a solução do preditor satisfaz as equações de balanço de potência. Portanto, os valores corrigidos são os mesmos preditos.

Na etapa de correção, como λ é o parâmetro da continuação, a última equação do sistema (3.16) é

$$\lambda - 1.000 = 0$$

A solução das equações não lineares parametrizadas da rede elétrica, a partir dos valores preditos, via método de Newton-Raphson é

$$\begin{bmatrix} \theta_2 \\ \theta_3 \\ V_2 \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.1182 \\ -0.1855 \\ 0.9822 \\ 1.0000 \end{bmatrix}$$

As novas potências geradas e cargas especificadas são as seguintes

P_1^g (MW)	P_3^g (MW)	P_2^d (MW)	P_3^d (MW)	Q_2^d (Mvar)
20.85	51.25	5.12	66.62	2.05

O sistema de equações lineares para a determinação do vetor tangente para a segunda iteração do método da Continuação, tem a última linha da matriz $[J_{\text{aum}}]$ semelhante à da iteração anterior, bem como o vetor do lado direito, pois o parâmetro da continuação continuou sendo λ . Com os dados da última iteração, este sistema é expresso como

$$\begin{bmatrix} 1.9115 & -0.9573 & 0.1423 & 0.00125 \\ -0.9445 & 1.4123 & -0.1621 & 0.00375 \\ -0.2423 & 0.0310 & 1.9045 & 0.0005 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta_2 \\ \Delta\theta_3 \\ \Delta V_2 \\ \Delta\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

O vetor tangente obtido para segunda iteração é

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta_2 \\ \Delta\theta_3 \\ \Delta V_2 \\ \Delta\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.00297 \\ -0.00470 \\ -0.00056 \\ 1.0000 \end{bmatrix}$$

Antes de calcular o ponto predito deve-se determinar o parâmetro da continuação para a próxima iteração. No exemplo este continuou sendo λ . Os valores preditos obtidos foram

$$\begin{bmatrix} \theta_2 \\ \theta_3 \\ V_2 \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.1212 \\ -0.1902 \\ 0.9816 \\ 2.0000 \end{bmatrix}$$

Novamente não foram necessárias as iterações do processo iterativo da etapa de correção, e portanto os valores corrigidos são os mesmos preditos. As novas potências geradas e cargas especificadas, são as seguintes

P_1^g (MW)	P_3^g (MW)	P_2^d (MW)	P_3^d (MW)	Q_2^d (Mvar)
21.37	52.50	5.25	68.25	2.10

O sistema de equações lineares para a fase de predição da terceira iteração do Método da Continuação é dado por

$$\begin{bmatrix} 1.9098 & -0.9568 & 0.1409 & 0.00125 \\ -0.9436 & 1.4109 & -0.1637 & 0.00375 \\ -0.2433 & 0.0293 & 1.9025 & 0.0005 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta_2 \\ \Delta\theta_3 \\ \Delta V_2 \\ \Delta\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

O vetor tangente obtido foi

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta_2 \\ \Delta\theta_3 \\ \Delta V_2 \\ \Delta\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.00297 \\ -0.00471 \\ -0.00057 \\ 1.0000 \end{bmatrix}$$

O processo continua segundo este procedimento, até o incremento $\Delta\lambda$ se tornar negativo, indicando que o ponto de bifurcação foi atingido.

Na abordagem “A”, para este sistema de três barras, foram realizadas 110 (cento e dez) iterações para que o máximo carregamento fosse atingido e o valor de λ obtido foi 146,7438, o que representa um acréscimo de 366,79% sobre a carga inicial. O elevado número de iterações se deve ao valor demasiado reduzido do incremento especificado na etapa de predição.

3.4.1.1.2 Abordagem “B”

O sistema de equações lineares para determinação do vetor tangente para a primeira iteração do Método da Continuação, utilizando a abordagem “B”, com os dados do caso base convergido, é

$$\begin{bmatrix} 1.9131 & -0.9578 & 0.1437 & 0.00125 \\ -0.9453 & 1.4138 & -0.1604 & 0.00375 \\ -0.2412 & 0.0327 & 1.9061 & 0.0005 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta_2 \\ \Delta\theta_3 \\ \Delta V_2 \\ \Delta\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Comparando a equação (3.20) com a equação (3.19), da abordagem “A”, percebe-se que a diferença entre essas duas expressões está na última linha. Na abordagem em questão, ao invés de acrescentar uma linha com todos os elementos iguais a zero exceto a posição correspondente a $\Delta\lambda$ que é igual a 1, o valor de uma das variáveis é especificado, sendo resolvido o sistema de equações (3.20). Considera-se por exemplo, $\Delta\lambda=1$ e resolve-se o conjunto de equações lineares. Isto é o mesmo que inserir uma equação especificando

o valor de uma variável no sistema de equações a ser resolvido. Desta maneira, o vetor tangente obtido é o mesmo da abordagem “A”.

A diferença entre as formas de predição das duas abordagens está no fato da abordagem “B” utilizar uma normalização no vetor tangente, equação (2.11). O valor de $\Delta\lambda$ é utilizado como fator de multiplicação no vetor tangente. Este vetor na forma escalonada é dado por

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta_2 \\ \Delta\theta_3 \\ \Delta V_2 \\ \Delta\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.0042 \\ -0.0066 \\ -0.0008 \\ 1.4142 \end{bmatrix}$$

e a solução predita é

$$\begin{bmatrix} \theta_2 \\ \theta_3 \\ V_2 \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.1195 \\ -0.1875 \\ 0.9820 \\ 1.4142 \end{bmatrix}$$

Após estes cálculos, passa-se à fase de correção. Nesta etapa, acrescenta-se ao sistema de equações inicial uma linha, que corresponde à equação do hiperplano perpendicular à direção de busca da solução exata para as equações do sistema. Desta forma, a dimensão da matriz Jacobiana torna-se maior do que a do fluxo de potência convencional em uma dimensão, ver equação (3.7). O sistema de equações a ser resolvido é o seguinte

$$\begin{bmatrix} 1.9108 & -0.9571 & 0.1417 & 0.00125 \\ -0.9441 & 1.4117 & -0.1628 & 0.00375 \\ -0.2427 & 0.0303 & 1.9038 & 0.0005 \\ -0.0042 & -0.0066 & -0.0008 & 1.4142 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta_2 \\ \Delta\theta_3 \\ \Delta V_2 \\ \Delta\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Os valores especificados de potências gerada e da carga especificadas para a próxima iteração do Método da Continuação são as seguintes

P_1^g (MW)	P_3^g (MW)	P_2^d (MW)	P_3^d (MW)	Q_2^d (Mvar)
21.06	51.77	5.18	67.30	2.07

No caso, nenhuma iteração foi necessária para a convergência do processo iterativo, e portanto os valores corrigidos são os mesmos preditos.

O sistema de equações lineares para a determinação do vetor tangente na segunda iteração do Método da Continuação é

$$\begin{bmatrix} 1.9108 & -0.9571 & 0.1417 & 0.00125 \\ -0.9441 & 1.4117 & -0.1628 & 0.00375 \\ -0.2427 & 0.0303 & 1.9038 & 0.0005 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta_2 \\ \Delta\theta_3 \\ \Delta V_2 \\ \Delta\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Novamente $\Delta\lambda$ foi considerado igual a 1 para que o sistema de equações acima pudesse ser resolvido. O vetor tangente obtido para segunda iteração foi

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta_2 \\ \Delta\theta_3 \\ \Delta V_2 \\ \Delta\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.00297 \\ -0.00471 \\ -0.00057 \\ 1.00000 \end{bmatrix}$$

A normalização no vetor tangente é realizada e obtém-se o valor de $\Delta\lambda$. Assim, o vetor tangente escalonado obtido na segunda iteração foi

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta_2 \\ \Delta\theta_3 \\ \Delta V_2 \\ \Delta\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.00420 \\ -0.00665 \\ -0.00080 \\ 1.41419 \end{bmatrix}$$

e os valores preditos para a solução nesta iteração são

$$\begin{bmatrix} \theta_2 \\ \theta_3 \\ V_2 \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.12367 \\ -0.19415 \\ 0.98117 \\ 2.82838 \end{bmatrix}$$

Uma vez mais não houve necessidade de correção e os valores corrigidos são os mesmos preditos. As novas potências geradas e cargas especificadas, são as seguintes

P_1^g (MW)	P_3^g (MW)	P_2^d (MW)	P_3^d (MW)	Q_2^d (Mvar)
21.79	53.54	5.35	69.60	2.14

O novo sistema de equações lineares para a terceira iteração do método, com os valores obtidos da última iteração, é dado por

$$\begin{bmatrix} 1.9084 & -0.9564 & 0.1397 & 0.00125 \\ -0.9430 & 1.4096 & -0.1651 & 0.00375 \\ -0.2442 & 0.0279 & 1.9015 & 0.0005 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta_2 \\ \Delta\theta_3 \\ \Delta V_2 \\ \Delta\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

O vetor tangente obtido foi

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta_2 \\ \Delta\theta_3 \\ \Delta V_2 \\ \Delta\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.00298 \\ -0.00412 \\ -0.00057 \\ 1.00000 \end{bmatrix}$$

O vetor tangente escalonado obtido na terceira iteração foi o seguinte

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta_2 \\ \Delta\theta_3 \\ \Delta V_2 \\ \Delta\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.00421 \\ -0.00667 \\ -0.00081 \\ 1.41419 \end{bmatrix}$$

E o processo continua até que o critério de parada seja satisfeito.

Na abordagem “B”, para este sistema de três barras, foram realizadas 105 (cento e cinco) iterações para que o máximo carregamento fosse atingido e o valor de λ obtido foi 146,7458, o que representa um acréscimo de 366,80% sobre a carga inicial. Comparando-se com o resultado obtido pela abordagem “A” (366,79%), percebe-se que as duas abordagens obtiveram resultados semelhantes.

3.4.2 Formulação em Coordenadas Retangulares

A formulação do fluxo de carga convencional em coordenadas cartesianas é apresentada no Apêndice A. As equações não lineares que representam a rede elétrica neste modelo são

$$(P_i^g - P_i^d) - P_i(y) = 0 \Rightarrow P_i(y) = \sum_{j=1}^n e_i (e_j G_{ij} - f_j B_{ij}) + f_i (f_j G_{ij} + e_j B_{ij}) \quad (3.21)$$

$$(Q_i^g - Q_i^d) - Q_i(y) = 0 \Rightarrow Q_i(y) = \sum_{j=1}^n f_i (e_j G_{ij} - f_j B_{ij}) - e_i (e_j B_{ij} + f_j G_{ij}) \quad (3.22)$$

para cada barra i do sistema de n barras. Os sobrescritos g e d denotam barra de geração e carga, respectivamente. As tensões em coordenadas retangulares, representadas por y nas equações (3.21) e (3.22), nas barras i e j são $(e_i + jf_i)$ e $(e_j + jf_j)$, respectivamente, e G_{ij} e B_{ij} são os elementos da matriz admitância de barra, Y_{barra} .

Para simular uma mudança de carga, as potências demandadas são parametrizadas da mesma forma mostrada anteriormente, com uma componente fixa correspondendo a carga base da barra i e outra componente representando a variação da carga através do parâmetro de carga λ .

Assim, a representação das cargas ativa e reativa é

$$P_j^d = P_{j_0}^d + \lambda \Delta P_j^d \quad (3.23)$$

$$Q_j^d = Q_{j_0}^d + \lambda \Delta Q_j^d \quad (3.24)$$

onde $P_{j_0}^d$ e $Q_{j_0}^d$ representam a carga ativa e reativa na barra j no caso base, ΔP_j^d e ΔQ_j^d são constantes usadas para especificar a taxa de variação na carga quando λ variar.

Desta mesma forma, pode-se parametrizar a geração de potência ativa das barras PV, fazendo com que a geração varie, acompanhando o nível de carga do sistema. O sistema de equações parametrizadas do fluxo de potência em coordenadas retangulares pode ser expresso na forma compacta como

$$f(e, f, \lambda) = 0 \quad (3.25)$$

onde e representa o vetor da parte real das tensões nas barras e f representa o vetor da parte imaginária das tensões nas barras. A dimensão de f é $2n - 1$, onde n é igual ao número de barras do sistema.

Uma vez determinada a solução do caso base, a predição da próxima solução pode ser feita usando qualquer das técnicas descritas na seção 2.2.1. Aplicando-se a expansão em série de Taylor, a expressão na forma matricial para o sistema de equações a ser resolvido, é a seguinte

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial e} & \frac{\partial f}{\partial f} & \frac{\partial f}{\partial \lambda} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} de \\ df \\ d\lambda \end{bmatrix} = 0 \quad (3.26)$$

A matriz do lado esquerdo desta última equação é a matriz Jacobiana do fluxo de potência convencional aumentada por uma coluna ($\partial f / \partial \lambda$), e o vetor deste mesmo lado é o vetor tangente. Da mesma forma que na formulação em coordenadas polares, neste sistema o número de equações é menor do que o de incógnitas, e portanto é necessário utilizar artifícios como os descritos na seção anterior para resolvê-lo.

Conforme sugerido no capítulo anterior, especifica-se o valor numérico de um dos componentes do vetor tangente, técnica utilizada na abordagem “A”, ou especifica-se uma das variáveis do sistema, por exemplo $\Delta\lambda = 1$, como utilizado na abordagem “B”, o que em última instância resulta no mesmo procedimento.

Após a fase de previsão, a correção da solução aproximada é necessária. Para esta correção recorre-se também a uma das técnicas já descritas na seção 2.2.3.

O parâmetro da continuação, matematicamente, corresponderá à variável de estado que tiver o maior componente em valor absoluto do vetor tangente. De uma maneira mais simples, este corresponderá à variável de estado que tem a maior taxa de variação próximo a uma dada solução. No caso em estudo, o parâmetro de carga λ é provavelmente a melhor escolha na partida de uma solução base, onde geralmente é suposto um nível de carga leve ou médio inicialmente. No início do processo as partes real e imaginária das tensões permanecem aproximadamente constantes, o que não acontece quando a solução se aproxima do ponto crítico. Neste ponto, λ não será uma boa escolha para o parâmetro da continuação, uma vez que ele será alterado apenas numa pequena faixa em comparação com outras variáveis de estado (e, f) . Por essa razão, a escolha do parâmetro da continuação deve ser reavaliada a cada passo. Feita a escolha para a primeira iteração, um bom critério de escolha para os passos subseqüentes é aquele baseado na maior componente do vetor tangente. Observe-se que, em coordenadas polares os componentes do vetor tangente, ΔV e $\Delta\lambda$, têm significado físico. Na formulação em coordenadas retangulares entretanto, apenas $\Delta\lambda$ tem significado físico, o que certamente torna mais difícil a especificação do parâmetro da continuação.

A verificação do ponto crítico é feita com base na variação do parâmetro da carga. Ou seja, $\Delta\lambda$ é zero no ponto crítico e é negativo além do ponto crítico. Assim, já que o vetor tangente foi calculado no passo preditor, um teste do sinal da componente irá revelar se o ponto crítico foi ultrapassado ou não.

3.4.2.1 Exemplo 2 – Formulação em Coordenadas Retangulares

O sistema exemplo descrito na seção 3.4.1 será utilizado aqui, para ilustrar a aplicação do Método da Continuação na formulação em coordenadas retangulares. A

solução do caso base (fluxo de potência convencional em coordenadas retangulares) está apresentada na Tabela 3.3 da referida seção.

As equações da rede elétrica para este sistema de três barras, parametrizadas por λ são iguais à equação (3.17), diferindo apenas no cálculo de P_2, P_3 e Q_2 , expressos pelas equações (3.27), (3.28) e (3.29), respectivamente.

Além destas equações, uma nova equação é introduzida:

$$e_3^2 + f_3^2 = |V_3|^2$$

As potências ativa e reativa calculadas em função das variáveis do sistema, em coordenadas retangulares, são

$$P_2 = e_2(e_1G_{21} - f_1B_{21}) + f_2(f_1G_{21} + e_1B_{21}) + e_3(e_2G_{23} + f_2B_{23}) + f_3(f_2G_{23} - e_2B_{23}) \quad (3.27)$$

$$P_3 = e_1(e_3G_{31} + f_3B_{31}) + f_1(f_3G_{31} - e_3B_{31}) + e_2(e_3G_{32} + f_3B_{32}) + f_2(f_3G_{32} - e_3B_{32}) \quad (3.28)$$

$$Q_2 = e_1(f_2G_{21} - e_2B_{21}) - f_1(f_1G_{21} + f_2B_{21}) + e_3(f_2G_{23} - e_2B_{23}) - f_3(e_2G_{23} + f_2B_{23}) \quad (3.29)$$

O sistema de equações lineares, na forma matricial, para a determinação do vetor tangente, é

$$-\begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial e_2} & \frac{\partial P_2}{\partial f_2} & \frac{\partial P_2}{\partial e_3} & \frac{\partial P_2}{\partial f_3} & -\Delta P_2^d \\ \frac{\partial Q_2}{\partial e_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial f_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial e_3} & \frac{\partial Q_2}{\partial f_3} & -\Delta Q_2^d \\ \frac{\partial |V_3|^2}{\partial e_2} & \frac{\partial |V_3|^2}{\partial f_2} & \frac{\partial |V_3|^2}{\partial e_3} & \frac{\partial |V_3|^2}{\partial f_3} & |V_3|^2 - e_3^2 - f_3^2 \\ \frac{\partial P_3}{\partial e_2} & \frac{\partial P_3}{\partial f_2} & \frac{\partial P_3}{\partial e_3} & \frac{\partial P_3}{\partial f_3} & \Delta P_3^g - \Delta P_3^d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta e_2 \\ \Delta f_2 \\ \Delta e_3 \\ \Delta f_3 \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

e a descrição de cada uma dessas derivadas está apresentada no Apêndice A.

A técnica de solução adotada neste exemplo será a da abordagem “A”. Ou seja, a reformulação das equações não lineares parametrizadas é feita adicionando-se uma equação extra ao sistema de equações não-lineares, a qual especifica o valor de uma das variáveis dependentes (e, f ou λ).

Para primeira iteração, o parâmetro da continuação será $\Delta\lambda$. Assim, o sistema de equações a ser resolvido, com os dados do caso base convergido, é

$$\begin{bmatrix} 0.3652 & 1.9175 & -0.2074 & -0.9506 & -0.0013 \\ 1.8656 & -0.4622 & -0.9506 & 0.2074 & -0.0005 \\ 0 & 0 & 1.9279 & -0.3534 & 0 \\ -0.2704 & -0.9369 & 0.2519 & 1.4155 & -0.0037 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0000 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta e_2 \\ \Delta f_2 \\ \Delta e_3 \\ \Delta f_3 \\ \Delta\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

O vetor tangente, obtido da solução do sistema de equações acima, foi

$$\begin{bmatrix} \Delta e_2 \\ \Delta f_2 \\ \Delta e_3 \\ \Delta f_3 \\ \Delta\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.00089 \\ -0.00282 \\ -0.00083 \\ -0.00454 \\ 1.00000 \end{bmatrix}$$

Para acelerar o processo de convergência o vetor tangente foi normalizado, utilizando a equação

$$\Delta\lambda = \frac{k}{\|dy/d\lambda\|}$$

$$\Delta y = \Delta\lambda \frac{dy}{d\lambda}$$

já descrita anteriormente. Assim, o vetor tangente normalizado obtido foi

$$\begin{bmatrix} \Delta e_2 \\ \Delta f_2 \\ \Delta e_3 \\ \Delta f_3 \\ \Delta\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.0013 \\ -0.0040 \\ -0.0012 \\ -0.0064 \\ 1.4142 \end{bmatrix}$$

Verifica-se a seguir, qual é a maior componente do vetor tangente em magnitude, para a seleção do parâmetro da continuação para próxima iteração. Conforme pode ser notado, o maior componente corresponde a $\Delta\lambda$, e portanto λ continua sendo o

parâmetro da continuação. Fazendo-se atualização dos valores especificados, os valores preditos obtidos foram

$$\begin{bmatrix} e_2 \\ f_2 \\ e_3 \\ f_3 \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.9701 \\ -0.1164 \\ 0.9627 \\ -0.1831 \\ 1.4142 \end{bmatrix}$$

Atualizam-se os valores das potências especificada e realiza-se a etapa de correção. Desde que o incremento no fator de carga é de valor reduzido, não é necessária nenhuma iteração do método de Newton-Raphson para a determinação da solução exata. Assim, as soluções predita e corrigida são coincidentes.

A segunda iteração do método da continuação é iniciada com a resolução do seguinte sistema de equações:

$$\begin{bmatrix} 0.3712 & 1.9154 & -0.2112 & -0.9590 & -0.0013 \\ 1.8612 & -0.4715 & -0.9490 & 0.2112 & -0.0005 \\ 0 & 0 & 1.9255 & -0.3662 & 0 \\ -0.2766 & -0.9351 & 0.2556 & 1.4127 & -0.0037 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0000 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta e_2 \\ \Delta f_2 \\ \Delta e_3 \\ \Delta f_3 \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

A solução deste sistema fornece o vetor tangente

$$\begin{bmatrix} \Delta e_2 \\ \Delta f_2 \\ \Delta e_3 \\ \Delta f_3 \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.00091 \\ -0.00282 \\ -0.00086 \\ -0.00455 \\ 1.00000 \end{bmatrix}$$

A normalização do vetor tangente resulta em

$$\begin{bmatrix} \Delta e_2 \\ \Delta f_2 \\ \Delta e_3 \\ \Delta f_3 \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.0013 \\ -0.0040 \\ -0.0012 \\ -0.0064 \\ 1.4142 \end{bmatrix}$$

Na segunda iteração os valores preditos são

$$\begin{bmatrix} e_2 \\ f_2 \\ e_3 \\ f_3 \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.9688 \\ -0.1192 \\ 0.9618 \\ -0.1876 \\ 2.8284 \end{bmatrix}$$

O processo iterativo prossegue desta maneira, até que o incremento de $\Delta \lambda$ na predição seja negativo, indicando que o máximo carregamento foi atingido. Neste exemplo, para este sistema de três barras, foram realizadas 125 (cento e vinte e cinco) iterações para que o máximo carregamento fosse atingido e o valor de λ obtido foi 145,1677, o que representa um acréscimo de 362,92% sobre a carga inicial.

Comparando-se o resultado obtido em coordenadas retangulares com o obtido em coordenadas polares, nas abordagens “A” e “B”, 366,80% e 366,79%, respectivamente, percebe-se a similaridade nas soluções.

3.4.2.2 Exemplo 3 – Preditor Secante

O sistema exemplo descrito na seção 3.4.1 é utilizado nesta subseção para ilustrar a aplicação do Método da Continuação utilizando como direção de predição o vetor secante. A técnica de correção utilizada é a mesma da Abordagem “B”, ou seja, o conceito de hiperplano perpendicular à direção de busca da solução predita.

As duas primeiras predições do Método da Continuação são feitas utilizando-se o vetor tangente. A predição seguinte é realizada definindo o vetor secante como a diferença entre as duas soluções corrigidas. Neste exemplo, são omitidas as duas primeiras iterações, pois as mesmas já foram descritas nos outros exemplos.

As soluções corrigida das duas primeiras iterações foram as seguintes:

$$\begin{bmatrix} e_2 \\ e_3 \\ f_2 \\ f_3 \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.115175 \\ -0.181226 \\ 0.970490 \\ 0.963098 \\ 1.0000 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad \begin{bmatrix} e_2 \\ e_3 \\ f_2 \\ f_3 \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.117999 \\ -0.185768 \\ 0.969588 \\ 0.962232 \\ 2.0000 \end{bmatrix}$$

A determinação do vetor secante para a terceira iteração do Método da Continuação foi feita subtraindo-se essas duas soluções. Isto fornece

$$\begin{bmatrix} \Delta e_2 \\ \Delta e_3 \\ \Delta f_2 \\ \Delta f_3 \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.117999 \\ -0.185768 \\ 0.969588 \\ 0.962232 \\ 2.000000 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -0.115175 \\ -0.181226 \\ 0.970490 \\ 0.963098 \\ 1.000000 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \Delta e_2 \\ \Delta e_3 \\ \Delta f_2 \\ \Delta f_3 \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.002824 \\ -0.004542 \\ -0.000902 \\ -0.000866 \\ 1.000000 \end{bmatrix}$$

A solução predita para terceira iteração foi portanto,

$$\begin{bmatrix} e_2 \\ e_3 \\ f_2 \\ f_3 \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.120824 \\ -0.190342 \\ 0.968698 \\ 0.961334 \\ 3.000000 \end{bmatrix}$$

Nesta iteração os valores corrigidos são os mesmos que os preditos. As novas potências geradas e cargas especificadas, são as seguintes

P_1^g	P_3^g	P_2^d	P_3^d	Q_2^d
21,89 MW	53,75 MW	5,37 MW	69,87 MW	2,15 Mvar

Para quarta iteração, o vetor secante obtido foi

$$\begin{bmatrix} \Delta e_2 \\ \Delta e_3 \\ \Delta f_2 \\ \Delta f_3 \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.120824 \\ -0.190342 \\ 0.968698 \\ 0.961334 \\ 3.000000 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -0.117999 \\ -0.185768 \\ 0.969588 \\ 0.962232 \\ 2.000000 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \Delta e_2 \\ \Delta e_3 \\ \Delta f_2 \\ \Delta f_3 \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.002825 \\ -0.004574 \\ -0.000890 \\ -0.000898 \\ 1.000000 \end{bmatrix}$$

A solução predita para quarta iteração foi

$$\begin{bmatrix} e_2 \\ e_3 \\ f_2 \\ f_3 \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.123649 \\ -0.194916 \\ 0.967808 \\ 0.960436 \\ 4.00000 \end{bmatrix}$$

Devido ao fato de que o incremento no fator de carga é de valor reduzido, as soluções predita e corrigida são novamente coincidentes.

O processo iterativo prossegue desta maneira, até que o incremento de $\Delta \lambda$ na predição seja negativo, indicando que o máximo carregamento foi atingido. Neste exemplo, para este sistema de três barras, foram realizadas 149 (cento e quarenta e nove) iterações para que o máximo carregamento fosse atingido e o valor de λ obtido foi 144,7004, o que representa um acréscimo de 361,80% sobre a carga inicial, aproximadamente o mesmo valor determinado anteriormente.

3.4.3 Índices de Proximidade

Nos dias atuais tem sido observado que os sistemas de potência são operados sob condições cada vez mais severas. A capacidade de manter a estabilidade de tensão tem se tornado uma preocupação crescente e medidas adequadas para melhorar o controle do nível de tensão e da potência reativa são requeridas com uma frequência cada vez mais crescente. Embora seja útil, e por vezes necessário encontrar soluções do fluxo de carga até o ponto crítico, mais informações podem ser obtidas durante a fase de geração dos resultados intermediários [Ajja92].

O uso de índices de estabilidade de tensão ou índices de colapso de tensão constituem uma forma alternativa do estudo de detecção e identificação de pontos críticos do sistema em termos da tensão. Estes índices são escalares monitorados continuamente para indicar quão próximo um sistema está de um problema de colapso de tensão. Alguns exemplos de índices de estabilidade de tensão são o mínimo valor singular e o autovalor real da matriz Jacobiana. Quanto mais próximo estes valores estão de zero, mais próximo o sistema está do colapso. Estes índices entretanto têm o problema de um comportamento não-linear, isto é, eles variam rapidamente quando o sistema se aproxima do seu ponto de bifurcação. Portanto, eles não são adequados para detecção da proximidade ao colapso [Souz96].

Outro indicativo da proximidade do ponto crítico, o qual também é capaz de apontar as barras “críticas” são as componentes do vetor tangente de predição. Os elementos deste vetor podem ser interpretados como coeficientes de sensibilidade entre as variáveis do sistema elétrico para um específico carregamento, correspondentes ao incremento $\Delta\lambda$. Um passo na direção tangente é usado para estimar a próxima solução. Entretanto, observando-se os elementos do vetor tangente como incrementos nas variáveis de estado (ΔV_j e $\Delta\theta_j$) em resposta a variações na carga do sistema ($\Delta\lambda$), uma análise de sensibilidade torna-se possível.

As barras críticas são aquelas que apresentam a maior variação da magnitude das tensões em função do carregamento. Um conjunto destas barras constitui uma área crítica específica do sistema, a qual sofre o maior impacto da instabilidade de tensão. Esta área crítica pode mudar de local enquanto o sistema está em fase de carregamento e é dependente também do cenário de carregamento especificado.

É importante notar, que se a barra j fosse afetada somente pela variação da sua própria carga, então a razão $|\Delta V_j / \Delta P_j^d|$ seria um bom indicador da fragilidade relativa da barra. Entretanto, a variação da carga em outras barras do sistema também afeta a magnitude da tensão na barra i . Por esta razão, o melhor critério para verificar qual barra está mais próxima do limite de estabilidade de tensão, é observar a barra com maior relação $|\Delta V_j / \Delta P_{total}|$, onde ΔP_{total} é a variação na carga ativa total do sistema. A variação na tensão em cada barra para uma variação na carga do sistema é disponível do vetor tangente. A variação total na carga ativa do sistema é dada por

$$\Delta P_{total} = \sum_1^n \Delta P_j^d$$

A barra crítica seria identificada como

$$\begin{aligned} \text{barra } j: \left| \frac{\Delta V_j}{\Delta P_{total}} \right| \\ = \left| \frac{\Delta V_j}{\Delta P_{total}} \right| = \max \left\{ \left| \frac{\Delta V_1}{\Delta P_{total}} \right|, \left| \frac{\Delta V_2}{\Delta P_{total}} \right|, \dots, \left| \frac{\Delta V_n}{\Delta P_{total}} \right| \right\} \end{aligned}$$

Desde que o valor de ΔP_{total} é o mesmo para cada barra, para um dado vetor tangente a barra crítica é aquela correspondente à maior componente ΔV .

Quando a barra crítica, j , atinge o limite de estabilidade em regime permanente, a razão $|\Delta V_j / \Delta P_{total}|$ torna-se infinita (grande variação em ΔV_j para uma pequena variação em ΔP_{total}). Equivalentemente, a razão $|\Delta P_{total} / \Delta V_j|$ torna-se zero, sendo esta última mais fácil de se manipular numericamente, e constituindo um índice adequado para a verificação da estabilidade de tensão do sistema. Este índice será alto quando a barra crítica estiver longe do limite de estabilidade, mas será zero quando a barra crítica estiver próxima do colapso de tensão.

Alternativamente, a razão $|\Delta V_j / \Delta Q_{total}|$ pode também ser usada para se observar as barras críticas. Neste caso, ΔQ_{total} será expresso da mesma forma que ΔP_{total} . O uso de ΔQ_{total} é requerido quando o carregamento do sistema envolve apenas a carga reativa.

Outra maneira de medir a distância do ponto de operação corrente em relação ao ponto crítico, é observar o comportamento da tensão na barra crítica. Quando próxima do ponto crítico, esta passa a ter uma grande variação em magnitude, em função de uma pequena variação na carga. Isto porém, é equivalente a se analisar as componentes do vetor tangente.

pequena variação em ΔP_{total}). Equivalentemente, a razão $|\Delta P_{total} / \Delta V_j|$ torna-se zero, sendo esta última mais fácil de se manipular numericamente, e constituindo um índice adequado para a verificação da estabilidade de tensão do sistema. Este índice será alto quando a barra crítica estiver longe do limite de estabilidade, mas será zero quando a barra crítica estiver próxima do colapso de tensão.

Alternativamente, a razão $|\Delta V_j / \Delta Q_{total}|$ pode também ser usada para se observar as barras críticas. Neste caso, ΔQ_{total} será expresso da mesma forma que ΔP_{total} . O uso de ΔQ_{total} é requerido quando o carregamento do sistema envolve apenas a carga reativa.

Outra maneira de medir a distância do ponto de operação corrente em relação ao ponto crítico, é observar o comportamento da tensão na barra crítica. Quando próxima do ponto crítico, esta passa a ter uma grande variação em magnitude, em função de uma pequena variação na carga. Isto porém, é equivalente a se analisar as componentes do vetor tangente.

No ponto de bifurcação o vetor tangente é uma aproximação do autovetor direito correspondente ao autovalor zero da matriz Jacobiana [Cañi94]. O menor valor singular é uma medida da distância da singularidade da matriz Jacobiana do fluxo de potência convencional. Se o mínimo valor singular é igual a zero, a matriz é singular e a solução do fluxo de potência não pode ser obtida. Isto pode ser interpretado como uma sensibilidade da solução do fluxo de potência a pequenas variações nos valores dos parâmetros. O autovetor direito pode ser usado para detectar variáveis (áreas) no sistema, com tendência ao colapso de tensão [Cañi93]. Note-se que a informação fornecida pelo autovetor direito pode ser obtida apenas quando o sistema está operando próximo do ponto de colapso.

Outros índices podem ser obtidos baseados em manipulações da matriz Jacobiana reduzida [Cañi96]. Por exemplo, para uma dada barra de carga i , assume-se que as variações de potência ativa e reativa ocorrem somente na barra de interesse. Portanto, reordenando a matriz Jacobiana de modo que as equações de P e Q para a barra i são as últimas, obtém-se

$$\det D'_{ii} = \frac{\det J}{\det A}$$

torna-se zero somente no ponto de bifurcação. A monitoração do determinante $\det D'_{ii}$ em pontos de operação diferentes para mudanças no fator de carregamento λ , fornece informação sobre a proximidade ao ponto crítico. Entretanto, um dos problemas com este índice de proximidade é a necessidade de se determinar a barra crítica do sistema, antes mesmo da proximidade ao colapso. Isto muitas vezes se torna inviável, pois ao longo do processo de carregamento do sistema a barra crítica muda algumas vezes, além do que há descontinuidade deste índice quando os limites operacionais dos sistemas são considerados.

3.5 CONCLUSÃO

Neste capítulo apresentaram-se as definições básicas do problema de instabilidade de tensão, analisando as metodologias que melhor se adequam ao objetivo deste trabalho. Uma revisão da literatura sobre a aplicação do Método da Continuação na análise do ponto de bifurcação estática em sistemas de potência foi apresentada.

A fundamentação teórica do método da Continuação em termos de variáveis do sistema de potência foi descrita, incluindo as formulações em coordenadas polares e retangulares e exemplos destes dois tipos de modelagem.

O método da Continuação fornece informações adicionais, as quais podem ser usadas na análise da estabilidade de tensão do sistema. Além da seqüência de soluções até o ponto de máximo carregamento, é possível, através de uma análise relativamente simples do vetor tangente, obter a identificação das áreas críticas com respeito ao ponto de colapso em cada condição de carregamento.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados numéricos obtidos a partir da aplicação do Método da Continuação em coordenadas retangulares, em duas abordagens diferentes. Dois aspectos principais são enfocados: primeiro, comparar as duas abordagens em termos da precisão e resultados; Segundo, comparar estas abordagens implementadas na UFSC com os programas PFLOW e FLUPOT. As simulações foram efetuadas em sistemas com características e dimensões diferentes, procurando comprovar a precisão das metodologias implementadas.

4.2 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O Método da Continuação em coordenadas retangulares foi implementado de duas formas diferentes. Na primeira (abordagem “A”), a técnica de correção utilizada é a de incluir uma equação que especifica o valor de uma das variáveis dependentes (V , θ e λ). A segunda (abordagem “B”), utiliza uma equação adicional que define um hiperplano perpendicular à direção de busca. As rotinas computacionais para as duas abordagens foram desenvolvidas em Fortran PowerStation

4.0. Algumas das rotinas usadas nos programas fazem parte de uma biblioteca desenvolvida no LABSPOT (Laboratório de Sistemas de Potência). Também, foram obtidos resultados utilizando o programa PFLOW, desenvolvido por Cañizares e Alvarado [Cañi93], que utiliza o Método da Continuação em coordenadas polares. Este foi obtido na Internet pois é de domínio público (Freeware). Outro programa também utilizado foi o FLUPOT (Programa de Fluxo de Potência Ótimo), desenvolvido pelo CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica) e cedido ao Labspot, na versão 3.0 limitada a 150 barras. O programa FLUPOT tem por objetivo calcular um estado para um sistema de potência em regime permanente que otimiza uma função objetivo e satisfaz uma série de restrições físicas e operacionais. Para execução do programa o usuário deve especificar, além dos dados da rede elétrica, três elementos básicos: função objetivo, relação de controles disponíveis e restrições a serem consideradas na otimização.

As funções objetivo do programa FLUPOT utilizadas neste trabalho foram as seguintes:

- ◆ Máximo carregamento - maximiza a carga, mantendo o mesmo fator de potência, de um conjunto de barras da rede a ser especificado pelo usuário;
- ◆ Mínima alocação de potência reativa shunt – opção que pode ser usada no contexto de planejamento, em redes com deficiência de reativo, ou como ferramenta no ajuste de casos de fluxo de potência.
- ◆ Mínimas perdas – novos valores para os controles são calculados de tal forma a minimizar as perdas de potência ativa na rede. Opção normalmente usada mantendo-se o despacho de potência ativa fixo nas barras de geração (exceto na referência) e o programa ajusta os controles de reativo de tal forma a minimizar as perdas elétricas.

Resultados da aplicação das várias versões do Método da Continuação e do FLUPOT, nos sistemas teste do IEEE e num sistema real, ilustram os aspectos enfocados.

Para validar o método estudado, para a determinação da máxima demanda, nas suas diferentes versões, foram utilizados os seguintes sistemas-teste do IEEE:

- ◆ Sistema de 14 barras;

- ◆ Sistema de 57 barras e
- ◆ Sistemas de 118 barras.

O sistema real utilizado foi o de 176 barras que representa o sistema Sul-Sudeste reduzido.

Os resultados, para cada sistema testado, enfocaram os seguintes tópicos:

- ◆ Comparação entre as diferentes versões do Método da Continuação;
- ◆ Comparação entre o Método da Continuação e o Método de Otimização de Pontos Interiores (FLUPOT);
- ◆ Análise do processo iterativo e das soluções finais;
- ◆ Avaliação do condicionamento numérico das matrizes envolvidas;
- ◆ Avaliação do efeito de compensação reativa;
- ◆ Avaliação do efeito dos tapes e
- ◆ Avaliação do efeito do despacho de potência ativa.

4.3 FORMAS DE ANÁLISE

Existem várias formas de se analisar o comportamento de sistemas elétricos para estudos de máximo carregamento e estabilidade de tensão, numa abordagem estática. São elas:

- ◆ Aumentar linearmente toda a carga ativa e reativa do sistema; opcionalmente pode-se aumentar apenas a carga ativa e/ou reativa de algumas ou de todas as barras do sistema;
- ◆ Manter-se constante ou não o fator de potência;
- ◆ Manter constante a geração de potência ativa das barras PV ou aumentar linearmente a geração ativa;

A fim de se analisar o problema de instabilidade de tensão, optou-se por considerar uma sobrecarga uniforme em todo o sistema, com e sem aumento da geração ativa das barras PV, e avaliar o desempenho do Método da Continuação.

As cargas dos sistemas foram modeladas como potência constante e o parâmetro λ foi usado para simular o incremento de carga ativa e reativa para o sistema, isto é, as cargas foram parametrizadas em função de λ

$$P_i^d = P_{i_0}^d + \lambda \Delta P_{i_0}^d$$

$$Q_i^d = Q_{i_0}^d + \lambda \Delta Q_{i_0}^d$$

onde $P_{i_0}^d$ e $Q_{i_0}^d$ representam as cargas base ativa e reativa, respectivamente. Para este modelo de carregamento, λ representa o fator de carregamento, $\Delta P_{i_0}^d$ e $\Delta Q_{i_0}^d$ são constantes e representam 2,5% das cargas base ativa e reativa. Os geradores, quando a geração ativa for variável, tiveram a mesma parametrização utilizada nas cargas, ou seja,

$$P_i^g = P_{i_0}^g + \lambda \Delta P_{i_0}^g$$

onde $P_{i_0}^g$ é a geração ativa base da barra PV e $\Delta P_{i_0}^g$ é constante e representa 2,5% da geração base na barra.

Os testes realizados e os resultados obtidos são apresentados e discutidos nas seções seguintes.

4.4 SISTEMA IEEE – 14 BARRAS

Os resultados apresentados a seguir são do Sistema IEEE - 14 barras. Os resultados das análises estão divididos em duas partes: o sistema operando sem limites de potência reativa e o sistema operando com limites de potência reativa gerada nas barras PV. A fim de analisar o problema de instabilidade de tensão, optou-se por considerar uma sobrecarga uniforme em todo o sistema e avaliar o comportamento deste.

4.4.1 Sem Limite de Potência Reativa

Caso Base

O caso base consiste no aumento das cargas ativas e reativas de todas as barras, mantendo-se constante o fator de potência, sem incremento da potência ativa gerada. Os resultados, no máximo carregamento obtido, para as mesmas condições iniciais, utilizando a abordagem “A”, a abordagem “B”, o PFLOW e o FLUPOT, com a função objetivo de *máximo carregamento*, serão descritos na sequência.

Para este caso o carregamento obtido foi de 262,30% nas abordagens “A” e “B”, enquanto que para os programas FLUPOT e PFLOW foram semelhantes, 258,9% e 261,28%, respectivamente.

Os níveis de tensão obtidos para a carga inicial e para a carga final, relativa ao último ponto convergido do processo, são apresentados na Figura 4.1.

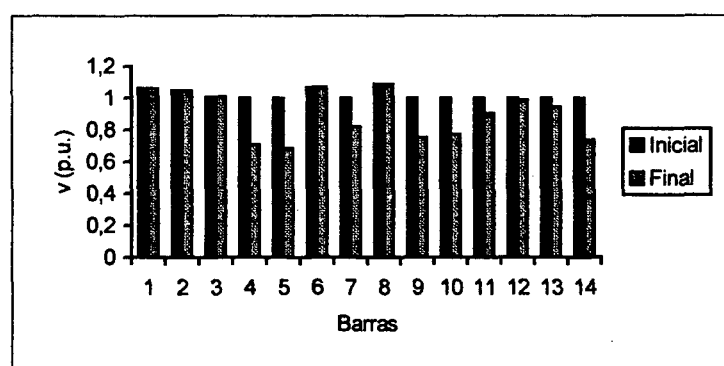


Figura 4.1. Comparação dos Perfis de tensão inicial e final para o Sistema de 14 barras, sem limite de reativo

Nos quatro programas estudados, a barra crítica no último ponto convergido, segundo o critério de menor tensão, foi a barra 5. Nas abordagens “A” e “B” onde é disponível o critério de identificação da barra crítica pelo vetor tangente (a barra crítica será a barra que obtiver o maior incremento no vetor tangente), a barra identificada foi a 14. No PFLOW, a indicação da barra crítica é obtida através do autovetor direito e, a barra indicada em primeiro lugar foi também a barra 14. Esta barra foi a que sofreu a maior variação na tensão devido a uma pequena variação na carga. A barra de menor tensão ao final do processo não caracteriza, necessariamente, a barra crítica, ou seja, a que sofrerá as maiores consequências decorrentes da instabilidade de

tensão. Para uma determinada área de um sistema, as tensões podem se apresentar naturalmente baixas, dispondo esta área de um suporte de reativo capaz de manter as tensões dentro de uma faixa de valores, mesmo que baixa, para situações de extremo carregamento [Sodr96].

A indicação das barras críticas, através do vetor tangente de predição corresponde a uma análise de sensibilidade das variáveis de estado do sistema em relação a um aumento na carga em torno de um ponto de operação. Assim, a área indicada como crítica para os pontos mais próximos do ponto crítico, seria a área crítica do sistema. Esta área determinaria a região do sistema mais propensa ao colapso de tensão e onde seria mais indicado haver uma correção de tensão, a fim de atingir um perfil adequado.

Na Figura 4.2 pode-se ver a curva P-V para barra 5 e na Figura 4.3 apresenta-se a curva P-V para barra 14.

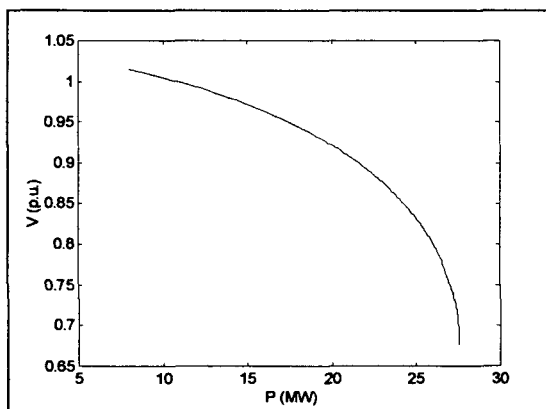


Figura 4.2. Curva P-V da barra 5 do sistema de 14 barras, sem limite de reativo

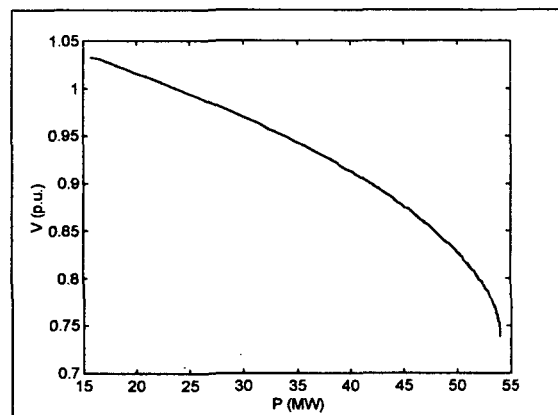


Figura 4.3. Curva P-V da barra 14 do sistema de 14 barras, sem limite de reativo

Para efeito de comparação apresenta-se na Figura 4.4 a curva P-V da barra 14 obtida através do PFLOW. Pode-se observar a semelhança do comportamento das tensões calculadas pelos dois métodos.

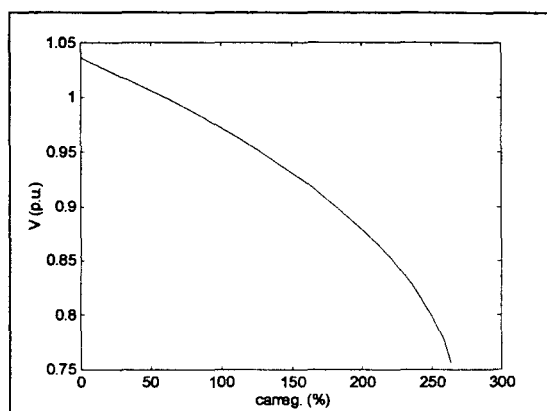


Figura 4.4. Curva P-V da barra 14 do sistema de 14 barras, sem limite de reativo, obtida pelo PFLOW

Cabe aqui comentar que o vetor tangente em coordenadas retangulares possui como elementos os Δe_i , Δf_i e $\Delta \lambda$, que são respectivamente os incrementos da parte real das tensões, os incrementos da parte imaginária das tensões e o incremento no fator de carregamento λ . Para identificação da barra crítica usou-se a seguinte aproximação

$$\Delta V_i = \sqrt{\Delta e_i^2 + \Delta f_i^2}$$

Assim, a barra crítica, a cada iteração do método da Continuação, será a que obtiver maior ΔV .

A indicação das barras críticas pelo programa PFLOW é através do autovetor direito. Estas barras são identificadas na primeira iteração, não sendo reavaliadas durante o processo de convergência do método.

A Figura 4.5 descreve o diagrama de bifurcação, curva Q-V, para barra 14. O extremo da curva corresponde ao ponto de máximo carregamento, onde a tensão desta barra está em 0,739 pu para um λ de 104,9229, o que representa uma carga reativa de 18,12 Mvar.

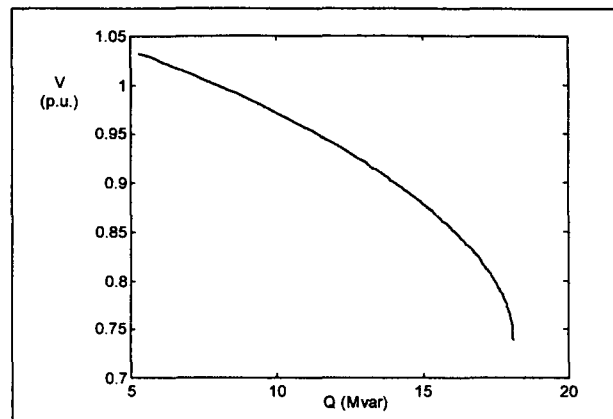


Figura 4.5. Curva Q-V para barra 14 do sistema de 14 barras, sem limite de reativo

A respeito da qualidade da solução predita, proximidade da solução exata, ou seja, quantas iterações na etapa de correção serão necessárias para se obter a solução exata, o que pode-se observar foi que tanto na abordagem “A” quanto na abordagem “B” o número de iterações corretoras necessárias foi o mesmo, apesar de que os conjuntos de equações resolvidos não são iguais. Nas iterações do método da Continuação em que houveram correção, estas não passaram de uma ou duas iterações.

Para efeito de comparação entre as abordagens “A” e “B”, observou-se o número de condicionamento numérico da matriz Jacobiana do fluxo de potência convencional, da matriz Jacobiana para a etapa de predição e para a matriz Jacobiana aumentada para a etapa de correção.

Um pequeno valor para o número de condicionamento refere-se ao que é chamada uma matriz bem-condicionada, que não é muito sensível a perturbações. De outro lado, se a matriz é altamente sensível a perturbações, é dita ser mal-condicionada, e é caracterizada por um valor alto de condicionamento. O número de condicionamento pode ser usado para medir a proximidade à singularidade da matriz Jacobiana do Fluxo de carga. No ponto de colapso de tensão, o número de condicionamento será igual a infinito [Pai89].

Percebe-se, ao longo do processo iterativo do Método da Continuação, que a adição de uma linha na matriz Jacobiana do fluxo de potência convencional, tanto na abordagem “A” quanto na abordagem “B”, melhora o condicionamento numérico desta matriz quando o sistema está carregado, conforme ficou demonstrado na Tabela 4.1. No último ponto convergido para esta situação, não houve correção.

	λ	Jacobiana Convencional (n°. condicionamento)	Jacobiana Predição (n°. condicionamento)
Abordagem "A"	96,0682	214.576,55	1.737,89
Abordagem "B"	96,0724	42.483,00	1735,20

Tabela 4.1. Número de Condicionamento das matrizes Jacobiana convencional e aumentada, do sistema de 14 barras sem limite de reativo

Uma diferença, observada entre as duas abordagens, ocorre quando o parâmetro da continuação deixa de ser o parâmetro de carga λ . Na abordagem "B" a última linha adicionada à matriz Jacobiana, na etapa de correção, é o vetor tangente calculado na etapa de predição, uma linha cheia. Na abordagem "A", a última linha é um vetor com todos os elementos nulos, exceto a posição correspondente ao parâmetro da continuação, onde o elemento é unitário. Assim, quando ocorre a troca do parâmetro da continuação, de λ para outra variável do sistema, na abordagem "A", a posição onde o elemento é unitário deixa de ser a diagonal principal, tornando o condicionamento numérico da matriz Jacobiana, nesta abordagem, diferente do obtido na abordagem "B".

Durante o processo iterativo, em algumas iterações, a matriz Jacobiana do fluxo convencional tem um número de condicionamento menor do que o da matriz Jacobiana aumentada, pelas duas abordagens. Quando se aproxima do máximo carregamento, esta situação se inverte e o condicionamento numérico da matriz Jacobiana aumentada passa a ser menor se comparado ao da Jacobiana convencional.

Para avaliar o efeito do nível de tensão das barras de geração no máximo carregamento, outro teste foi realizado. Alterando-se as condições iniciais das tensões nas barras de geração para 1,0 pu, o percentual de carregamento obtido passou de 262,30% para 233,0% (a tensão nas barras de geração foi diminuída, ver Apêndice B). A tensão na barra crítica, barra 14, passou de 0,739 para 0,671 pu. Alterando-se as tensões para 1,05 pu o carregamento foi para 259,91%. A tensão na barra crítica passou para 0,713 pu. O aumento da tensão nas barras de geração, de 1,0 para 1,05 pu, fez com que o carregamento obtido fosse superior, assim como as tensões finais nas barras de carga. Isto deve-se ao fato de que o aumento das tensões nas barras de geração provoca

um aumento do fluxo nas linhas de transmissão, e com isso, permite atender a uma maior demanda do sistema.

Efeito dos Tapes

Para analisar o efeito dos tapes dos transformadores com relação de transformação variável sob carga sobre o máximo carregamento e no nível das tensões finais, procedeu-se da seguinte forma: usou-se o FLUPOT com a função objetivo *máximo carregamento* e como variáveis de otimização a potência ativa gerada, a potência reativa gerada e os tapes. A potência ativa gerada na barra de folga foi liberada, enquanto que nas demais barras PV foram especificadas de acordo com seus valores normais, ver Apêndice B; a potência reativa gerada nas barras PV foi liberada; os tapes dos transformadores foram liberados dentro da faixa de 0,95 e 1,05.

O carregamento obtido foi de 262,30% enquanto que com os tapes fixos o carregamento foi de 258,91%, para os mesmos dados iniciais. A maior diferença encontra-se no nível das tensões finais nas barras de carga, pois com os tapes variáveis estas foram superiores.

Para complementar esta análise, os valores finais dos tapes, obtidos no FLUPOT, são especificados e utilizados nos programas do Método da Continuação em coordenadas retangulares, nas duas diferentes abordagens. Nas abordagens “A” e “B” o máximo carregamento obtido foi de 262,58%. As tensões nas barras mais críticas (barra 5, 12 e 14) tiveram o perfil superior, se comparadas ao resultado obtido com os valores dos tapes iniciais. O valor dos tapes, resultante da aplicação do FLUPOT, possibilitou um carregamento maior do que aquele obtido através do uso de seu valor inicial. Mesmo com um carregamento maior, a alteração nos tapes fez com que o nível das tensões no sistema fosse mais elevado.

Efeito do Despacho de Potência Ativa

Para avaliar o efeito do despacho de potência ativa no máximo carregamento fez-se o seguinte teste: distribuiu-se a geração de potência ativa entre a barra de folga e as barras de geração do tipo PV. Para o sistema IEEE - 14 barras, existe uma única barra PV com geração ativa, que é a barra 2. As demais barras geram apenas potência reativa, como pode-se ver nos dados do Apêndice B. A geração nesta barra que

era de 40 MW foi majorada para 300MW. O efeito no máximo carregamento pode ser observado na Tabela 4.2.

	Carregamento	Barra 1 (folga)	Barra 2 (PV)
Caso Base	262,30%	1536,73 MW	40,00 MW
Despacho de Potência Ativa	270,78%	1186,26 MW	300,00 MW

Tabela 4.2. Resultados finais, com despacho da geração ativa, para o sistema de 14 barras, sem limite de reativo

O aumento na geração ativa na barra 2 provocou um aumento, no máximo carregamento, de aproximadamente 8% em relação a carga base, demonstrando que o máximo carregamento é sensível ao despacho de potência ativa. Os maiores valores de fluxo de potência ativa, com a geração ativa na barra 2 em 40 MW, eram nas linhas de transmissão 1-2, 1-5, 2-3, 2-4 e 2-5; com a mudança da geração ativa para 300MW o fluxo nas linhas 1-2 e 1-5 diminuiu e o fluxo nas linhas 2-3, 2-4 e 2-5 aumentou, como pode-se ver na Tabela 4.3. Isto mostra que o aumento na geração da barra 2 fez com que esta passasse a suprir uma parcela maior da demanda total do sistema, enquanto que a demanda suprida pela barra de folga (barra 1) diminuiu.

Geração Ativa	LT 1-2	LT 1-5	LT 2-3	LT 2-4	LT 2-5
40 MW	1188,79 MW	347,94 MW	399,91 MW	286,04 MW	221,17 MW
300 MW	865,97 MW	319,29 MW	415,35 MW	300,66 MW	240,34 MW

Tabela 4.3. Fluxos ativos nas linhas de transmissão do sistema de 14 barras, sem limite de reativo

Efeito da Compensação de Potência Reativa

Usando-se o FLUPOT, com as funções objetivo *mínima alocação de potência reativa shunt* e *máximo carregamento*, avaliou-se o comportamento do sistema com a alocação de reativo e a influência desta na tensão das barras críticas. O teste foi feito sem incluir nos dados as fontes de compensação reativa existentes no sistema.

Um problema encontrado na execução da função objetivo *mínima alocação de potência reativa*, no programa FLUPOT, foi o fato de ser necessário liberar

as magnitudes das tensões, com exceção da barra de folga cuja tensão foi estipulada em seu valor nominal, dentro de uma faixa estreita de operação (entre 0,95 e 1,05 pu), para que o programa alocasse fontes de compensação reativa.

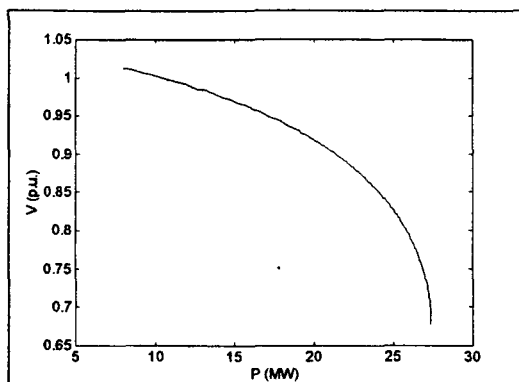


Figura 4.6. Curva P-V da barra 5 para o sistema de 14 barras sem shunt e sem limite de reativo

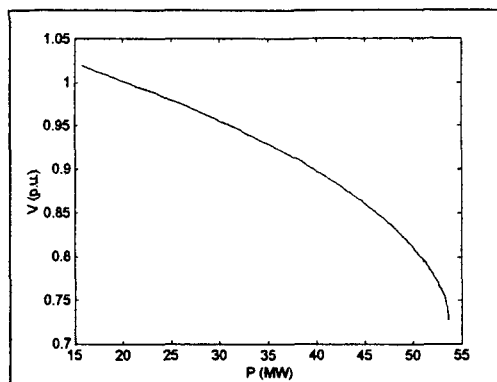


Figura 4.7. Curva P-V da barra 14 para o sistema de 14 barras sem shunt e sem limite de reativo.

O programa FLUPOT alocou 14,7 Mvar na barra 14, que nos testes anteriores foi considerada a barra crítica. O percentual de carregamento obtido por este programa foi de 126,53%, sendo que a tensão na barra crítica foi de 0,95 pu (fixada no limite mínimo especificado).

Com os valores finais de tensão obtidos nas barras PV pelo FLUPOT e com a fonte de compensação reativa alocada na barra 14, executou-se o programa para cálculo do máximo carregamento pelo Método da Continuação. A curva PV das barras 5 e 14 são apresentadas nas Figuras 4.6 e 4.7, respectivamente, sem fontes de reativo no sistema.

Para efeito de comparação, registraram-se os resultados obtidos para o sistema operando sem a compensação reativa e para o sistema operando com compensação reativa de 14,7 Mvar na barra 14. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.4.

	Carregamento	Tensão na barra 5	Tensão na barra 14
Sem compensação	257,42%	0,678 pu	0,700 pu
Com compensação	259,12%	0,679 pu	0,727 pu

Tabela 4.4. Resultados para o sistema de 14 barras, com e sem alocação de shunt reativo, para o sistema sem limite de reativo

Nesta análise, procurou-se em primeiro lugar identificar as áreas mais sujeitas a instabilidade de tensão e após, analisar o comportamento das barras críticas de maneira a poder estabelecer o comportamento do sistema operando com e sem fontes de compensação reativa, enquanto o sistema é sobrecarregado.

Nas Figuras 4.8 e 4.9 pode-se ver as curvas P-V para duas barras do sistema, as barras 5 e 14, respectivamente, para o sistema com compensação de potência reativa.

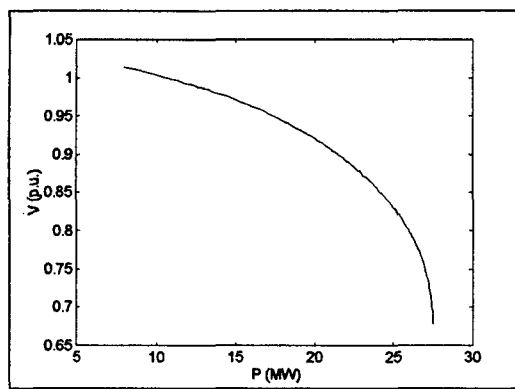


Figura 4.8. Curva P-V para barra 5 do sistema de 14 barras com alocação de shunt e sem limite de reativo

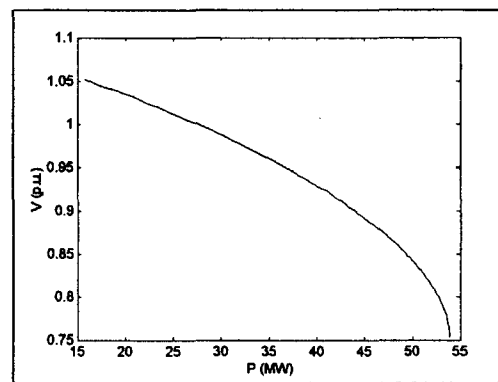


Figura 4.9. Curva P-V para barra 14 do sistema de 14 barras com alocação de shunt e sem limite de reativo

Pode-se observar que o percentual de carregamento obtido pelo Método da Continuação foi superior ao obtido utilizando o programa FLUPOT, 126,53% e 259,12%, respectivamente. Isto deve-se ao fato de que na execução do programa FLUPOT para alocar fontes reativas foi necessário limitar as magnitudes das tensões em torno de 0,95 e 1,05 pu, o que não ocorreu no Método da Continuação, pois não foram incluídos limites de tensão em barras PQ. A limitação das magnitudes das tensões nas barras PQ dentro de uma faixa especificada permite em geral que se obtenha a convergência e, além disso, ter-se uma indicação das barras nas quais existem problemas de suporte de potência reativa (barras cujas magnitudes de tensão estão fixadas no limite) [Mont83]. As barras que atingiram o limite inferior no FLUPOT foram a barra 5 e a barra 14. A primeira, é a barra crítica pelo critério de menor tensão

e, a segunda, é a barra crítica pelo critério de maior componente no vetor tangente, confirmando o que foi descrito acima.

Um teste a mais foi feito preparando-se os dados do sistema em estudo, através do uso do programa FLUPOT com a função objetivo *mínima perda* (novos valores para os controles são calculados de tal forma a minimizar as perdas de potência ativa na rede). Limitando-se as magnitudes das tensões entre 0,95 e 1,05 pu, que representam a faixa normalmente aceitável para as tensões de um sistema de energia elétrica, obtiveram-se os valores das tensões a serem especificados nos programas do Método da Continuação. Assim, os dados iniciais para o cálculo do máximo carregamento têm as tensões dentro da faixa aceitável de operação.

O percentual de carregamento obtido nas abordagens “A” e “B” foi de 243,36%. No PFLOW este percentual foi de 241,5% e no FLUPOT, de 243,35%. Como, para esta situação, as tensões nas barras PV foram menores do que no caso base, ver Apêndice B, tanto o carregamento quanto o nível de tensões finais foram menores. Como houve diferença no carregamento final, com dados para mínima perda se comparado aos dados iniciais, não há ponto de comparação entre as perdas obtidas. As perdas foram maiores no caso base, mas justificadas pelo carregamento superior fornecido.

Outro Estudo

Para se analisar o comportamento do Método da Continuação, nas diversas abordagens, foram experimentadas outras configurações para o sistema. Agora, aumentaram-se as cargas ativas e reativas em todas as barras e incrementou-se a geração ativa nas barras PV.

O carregamento obtido, para esta situação, foi diferente do que com a potência ativa gerada fixa. O carregamento que era de 262,30%, nas abordagens “A” e “B”, passou para 266,31%. No PFLOW, o acréscimo foi semelhante, de 261,28% para 263,37%.

A mudança correspondente de geração para atender a carga pode ser atribuída apenas à barra de folga (“swing”) ou a todos os geradores, de acordo com os fatores de participação das unidades. Quando a geração nas barras PV estava fixa, quem

supria a geração necessária para satisfazer as equações de balanço de potência (geração menos demanda e perdas, igual a zero), era a barra de folga. Com o aumento da geração ativa nas barras PV durante o processo iterativo, a participação da barra de folga, na geração para satisfazer as equações de balanço de potência, foi diminuída.

	Carreg. (%)	Barra 1 (folga)	Barra 2 (PV)
Geração ativa fixa	262,30	1536,73 MW	40,00 MW
Geração ativa variável	266,31	1380,02 MW	146,52 MW

Tabela 4.5. Resultados finais da geração ativa para o sistema de 14 barras, sem limite de reativo

Na Tabela 4.5 pode-se observar, para as duas situações, a geração nas barras 1 e 2, barras de folga e PV, respectivamente. Para esta configuração, houve uma alteração dos fluxos nas linhas de transmissão, que ocasionou, para este sistema, uma diferença no carregamento máximo obtido.

4.4.2 Com Limite de Potência Reativa

As injeções de potência reativa nas barras PV são, a cada iteração, calculadas para observar-se se esses valores estão dentro dos limites especificados ou não. Se o valor calculado estiver fora dos limites especificados os tipos das barras nas quais isso ocorre são redefinidos, passando de PV para PQ, com injeções de reativos especificadas no limite violado, ou seja, se atingiu o limite superior a potência reativa na barra é fixada no limite superior e, se atingiu o limite inferior é fixada no limite inferior. Ao mesmo tempo, as magnitudes das tensões dessas barras são liberadas, passando a ser calculadas a cada iteração como parte do vetor das variáveis dependentes. Para o sistema de coordenadas cartesianas, utilizado neste estudo, para todas as barras, exceto a barra de folga, correspondem duas equações no sistema de equações a ser resolvido. O que muda, portanto, é a equação incluída. A equação A.9, no Apêndice A, impõe uma restrição ao módulo da tensão que deve permanecer constante nas barras PV. Assim

quando a barra muda de PV para PQ a equação A.9 é substituída pela equação A.8, que representa as barras tipo PQ.

As barras que atingiram o limite de potência reativa gerada são convertidas em PQ e não há recuperação das barras PV após sua conversão, ou seja, após uma barra PV ter sido transformada em PQ não se testa a possibilidade da mesma voltar a seu tipo original.

Se o limite superior de potência reativa for atingido, a tensão tende a cair devido à insuficiência de suporte de potência reativa. Raciocínio análogo vale quando é atingido o limite inferior, onde a magnitude de tensão tende a subir.

O primeiro teste realizado foi com o aumento das cargas ativas e reativas, mantendo constante o fator de potência, sem incremento da potência ativa gerada. Para potência ativa gerada nas barras PV foram especificados limites (conforme Apêndice B)

Os resultados obtidos nas abordagens “A” e “B” foram semelhantes, sendo que os carregamentos obtidos foram de 47,37% e 47,56%, respectivamente. O programa PFLOW e o programa FLUPOT apresentaram, também, resultados semelhantes, 46,34% e 46,0%, respectivamente.

Os níveis de tensão obtidos para a carga inicial e para a carga final, no último ponto convergido, são apresentados na Figura 4.10. Comparando-se com a Figura 4.1, pode-se observar que os níveis de tensões finais obtidos com as potências reativas geradas nas barras PV liberadas, foram superiores aos obtidos com o sistema limitado.

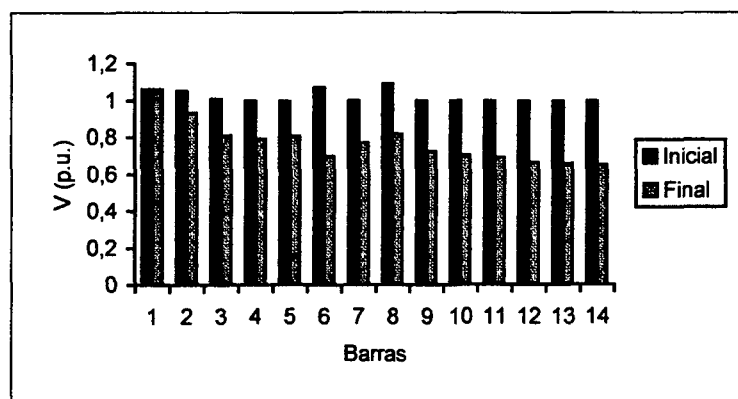


Figura 4.10. Perfis de tensão inicial e final para o sistema de 14 barras, com limite de reativo

A queda no carregamento final, se comparado com o sistema operando sem limites de potência reativa, é devido ao esgotamento de suprimento de potência reativa nas barras PV. É observado, que quando os limites de potência reativa são atingidos o colapso de tensão ocorre em um menor carregamento. Isto faz sentido, desde que o colapso de tensão é definido como uma deficiência de reativo no sistema. Se a quantidade de potência reativa é limitada, a deficiência de reativo no sistema acelerará o colapso de tensão. Neste sistema IEEE - 14 barras, todas as barras do sistema atingiram o limite superior de potência reativa gerada. Isto demonstra a deficiência de reativos do sistema quando este fica sujeito a uma sobrecarga, refletindo a importância das fontes de reativos e seus efeitos no colapso de tensão se forem inadequadamente alocadas e operadas. O esgotamento das fontes de reativo justifica a queda das tensões finais com o sistema operando com limites de potência reativa gerada, se comparado ao sistema operando sem limites de reativo.

A barra crítica, para os dois critérios utilizados, ou seja, a de menor tensão e a de maior incremento no vetor tangente, foi a barra 14. A mudança de barra crítica, pelo critério de menor tensão (quando não se limitava a potência reativa gerada, a barra 5 era a barra crítica), deve-se ao fato da barra 14 ser “fortemente” ligada à barra de geração 6. Como a potência reativa gerada nesta barra atingiu o limite superior, 24 Mvar, a injeção de potência reativa foi limitada (sem limite de reativo esta barra gerava 532 Mvar) e com isso, as tensões atingiram um nível mais reduzido. Na barra 5, que sem limites de potência reativa era a barra de menor tensão, atingiu um nível de tensão superior, pois é ligada diretamente a barra 1, que é a barra de folga. O comportamento das curvas PV das barras 5 e 14 é apresentada nas Figuras 4.11 e 4.12, respectivamente.

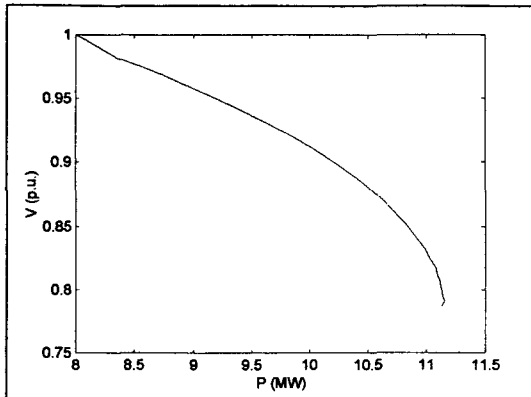


Figura 4.11. Curva P-V da barra 5 do sistema de 14 barras, com limite de reativo

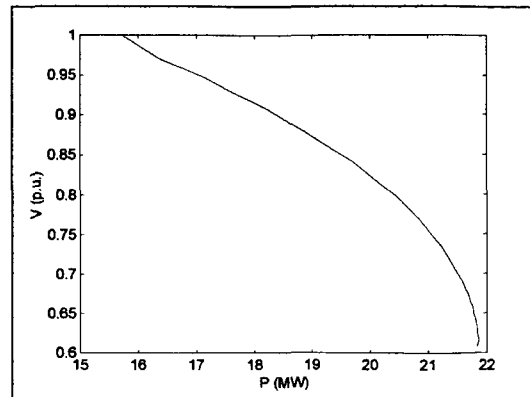


Figura 4.12. Curva P-V da barra 14 do sistema de 14 barras, com limite de reativo

O gráfico da Figura 4.13 ilustra a curva Q-V para a barra 14. Comparando-se com o gráfico da Figura 4.5, nota-se que a tensão final, com limite de potência reativa gerada, foi menor do que o sistema operando sem limites de reativo, passando de 0,739 pu para 0,635 pu, embora o percentual de carregamento tenha sido inferior, fato este justificado pelo esgotamento de fontes de reativo, como já mencionado anteriormente.

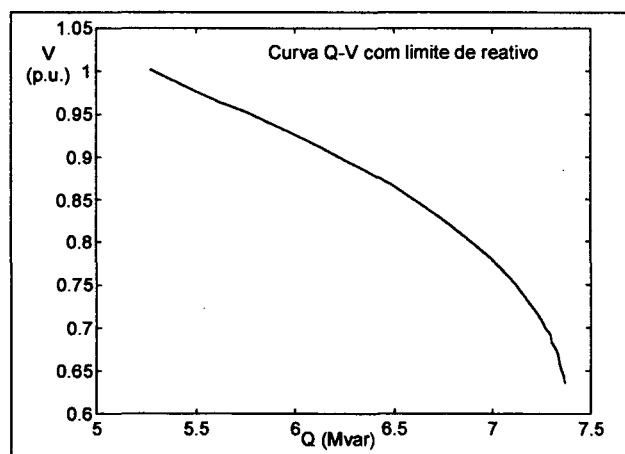


Figura 4.13. Curva Q-V da barra 14 do sistema de 14 barras, com limite de reativo

O comportamento da tensão na barra de geração 3 quando esta atingiu o limite de potência reativa gerada, pode ser observado na Figura 4.14. Neste ponto, a barra foi convertida de barra tipo PV em barra tipo PQ, ou seja, a tensão nesta barra foi liberada e passou a ser uma variável na solução do sistema de equações; a potência

reativa gerada fica fixada no limite atingido, neste caso, o limite superior. A carga reativa continuou sendo incrementada, mas a tensão decai devido ao esgotamento das fontes de reativo.

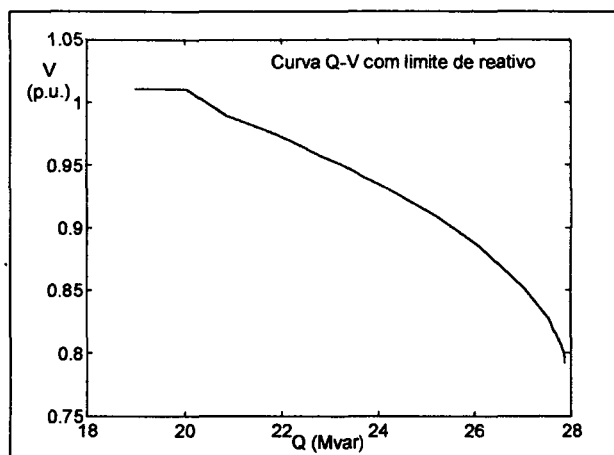


Figura 4.14. Curva Q-V da barra 3 do sistema de 14 barras, com limite de reativo

O condicionamento numérico das matrizes envolvidas no cálculo do máximo carregamento nas abordagens “A” e “B”, está apresentado na Tabela 4.6.

	λ	Jacobiana Convencional (nº. condicionamento)	Jacobiana Predição (nº. condicionamento)
Abordagem “A”	47,37%	21.767,79	812,61
Abordagem “B”	47,56%	13.063,72	829,34

Tabela 4.6. Número de condicionamento das matrizes Jacobiana convencional e aumentada, do sistema de 14 barras com limite de reativo

Assim como no sistema não limitado, a matriz Jacobiana aumentada possui um melhor condicionamento numérico, para a condição de máximo carregamento do que a Jacobiana convencional.

Outro teste foi realizado para avaliar o efeito do nível da tensão nas barras de geração sobre o máximo carregamento.

A alteração da tensão nas barras PV, em relação ao caso base (ver Apêndice B), para 1,0 pu alterou o percentual de carregamento do sistema, de 47,56% foi para 39,31%. A tensão na barra crítica, barra 14, passou de 0,608 para 0,589 pu.

Alterando-se para 1,05 pu, o carregamento foi de 47,56%, igual ao caso base, mas a tensão na barra crítica foi de 0,603 pu.

O aumento do nível de tensão nas barras de geração fez com que o carregamento obtido fosse superior, fato este justificado pela alteração que este aumento causa no fluxo ativo e reativo nas linhas de transmissão.

Efeito dos Tapes

O efeito dos tapes foi analisado da mesma forma que o teste para o sistema sem limites de potência reativa gerada, com exceção de que, para este estudo, foi especificado limites para potência reativa gerada nas barras PV.

O carregamento que era de 47,37%, com os tapes fixos passou para 47,60%, no programa FLUPOT.

Para complementar a análise, os valores dos tapes obtidos pelo FLUPOT foram especificados para o Método da Continuação. O carregamento obtido foi semelhante, passou de 47,33% para 47,60%. As tensões nas barras de carga tiveram um perfil superior ao sistema com os valores dos tapes dos dados iniciais.

Neste estudo, chegou-se à mesma conclusão que para o sistema sem limites: os tapes alteram o carregamento e o perfil de tensões finais. Como para este estudo utilizou-se o FLUPOT com função objetivo para *máximo carregamento*, os valores de tapes obtidos afetaram positivamente o sistema, no sentido de aumentar o nível de carregamento para este sistema.

Efeito do Despacho de Potência Ativa

O comportamento do sistema para um despacho de potência ativa, com a mesma alteração realizada para o sistema operando sem limites, ou seja, aumentando a geração ativa da barra 2 para 300MW, está apresentado na Tabela 4.7.

	Carregamento	Barra 1 (folga)	Barra 2 (PV)
Caso Base	46,50%	431,16 MW	40 MW
Despacho de Potência Ativa	39,03%	110,18 MW	300 MW

Tabela 4.7. Resultados finais, com despacho de geração ativa, para o sistema de 14 barras com limite de reativo

Os maiores valores de fluxo de potência ativa, com a geração ativa na barra 2 em 40 MW eram nas linhas de transmissão 1-2, 1-5, 2-3, 2-4 e 2-5; com a mudança da geração ativa para 300MW o fluxo nas linhas 1-2, 1-5 e 2-3 diminuiu e o fluxo nas linhas 2-4 e 2-5 aumentou, ver Tabela 4.8. Isto mostra que o aumento na geração da barra 2 fez com que esta passasse a suprir uma parcela maior da demanda total do sistema, assim como ocorreu no sistema não limitado.

Geração Ativa	LT 1-2	LT 1-5	LT 2-3	LT 2-4	LT 2-5
40 MW	299,33 MW	131,83 MW	119,26 MW	95,73 MW	71,51 MW
300 MW	33,90 MW	76,27 MW	115,80 MW	101,82 MW	85,42 MW

Tabela 4.8. Fluxos ativos nas linhas de transmissão do sistema de 14 barras com limite de reativo

Efeito da Compensação de Potência Reativa

Os testes para *mínima alocação de potência reativa shunt*, para o sistema com limites de geração de potência reativa, não foram possíveis pois o FLUPOT, para esta condição, não alocou nenhuma fonte de compensação reativa.

O teste realizado para o sistema com os dados para *mínima perda* obtidos através do programa FLUPOT, para as mesmas condições já descritas para o sistema sem limites de reativo, foi realizado para o sistema com limites de potência reativa gerada.

O percentual de carregamento obtido nas abordagens “A” e “B” foi de 45,71%. No PFLOW este percentual foi de 45,29% e no FLUPOT de 46,0%. Novamente, o carregamento obtido com os dados para mínima perda foram diferentes dos obtidos com os dados normais. Como a tensão nas barras geradoras foi especificado em valor inferior ao caso base, justificando assim, o menor carregamento obtido.

Outro Estudo

Outro estudo foi realizado para avaliar o comportamento do Método da

linearmente e com a geração ativa variando nas barras PV, para o sistema operando com controle da potência reativa gerada.

Assim como, no sistema sem limites de potência reativa, quando a geração nas barras PV estava fixa, quem supria a geração necessária para atender a carga era a barra de folga, com a geração ativa da barra PV acompanhando o crescimento da carga, a geração na barra de folga foi diferente.

	Carregamento	Barra 1 (folga)	Barra 2 (PV)
Geração ativa fixa	47,56%	433,99 MW	40,00 MW
Geração ativa variável	47,24%	410,96 MW	58,90 MW

Tabela 4.9. Resultados finais da geração ativa para o sistema de 14 barras, com limites de potência reativa

Isto pode ser observado na Tabela 4.9, onde a geração ativa no máximo carregamento, para as barras de geração do sistema de 14 barras, com a geração ativa fixa e com a geração ativa crescendo linearmente nas barras PV é apresentada.

4.5 SISTEMA IEEE - 57 BARRAS

Os resultados apresentados a seguir são do Sistema IEEE - 57 barras. Assim como, para o Sistema IEEE - 14 barras, os resultados das análises estão divididos em duas partes: sem limites de potência reativa e com limites de potência reativa gerada.

4.5.1 Sem Limite de Potência Reativa

Caso Base

O caso base, assim como para o sistema IEEE – 14, consiste no aumento das cargas ativas e reativas de todas as barras, mantendo-se constante o fator de potência, sem incremento da potência ativa.

O carregamento obtido foi de 68,53% e de 67,91%, nas abordagens “A” e “B”, respectivamente, enquanto que o carregamento obtido pelo FLUPOT e pelo PFLOW foram semelhantes, 68,42% e 67,99%, respectivamente. Os níveis de tensão obtidos para carga inicial e para carga final, relativas ao último ponto convergido do processo, são apresentados na Figura 4.15.

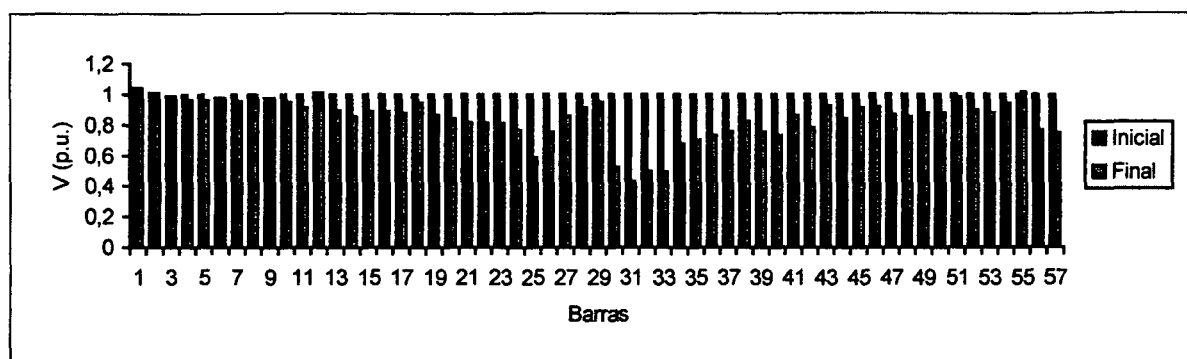


Figura 4.15. Perfis de tensão inicial e final para o sistema de 57 barras, sem limite de reativo

Para este sistema de 57 barras, as barras críticas no máximo carregamento, pelo critério de menor tensão e pelo critério de maior componente no vetor tangente de predição foram as barras 31, 33, 32 e 30 (em ordem decrescente de importância). Estas barras estão ligadas entre si por linhas de transmissão e formam uma área crítica, ou seja, a área mais propensa à instabilidade de tensão em situações de carga pesada.

A Figura 4.16 descreve o diagrama de bifurcação, curva P-V, para a barra de maior variação no vetor tangente de predição, barra 31.

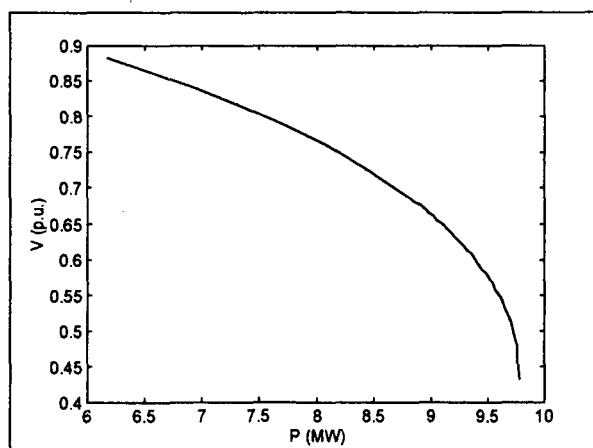


Figura 4.16. Curva P-V para a barra 31 do sistema de 57 barras, sem limite de reativo

Comparando-se esta curva P-V com a obtida através do programa PFLOW, Figura 4.17, mostra-se mais uma vez a concordância dos dois métodos.

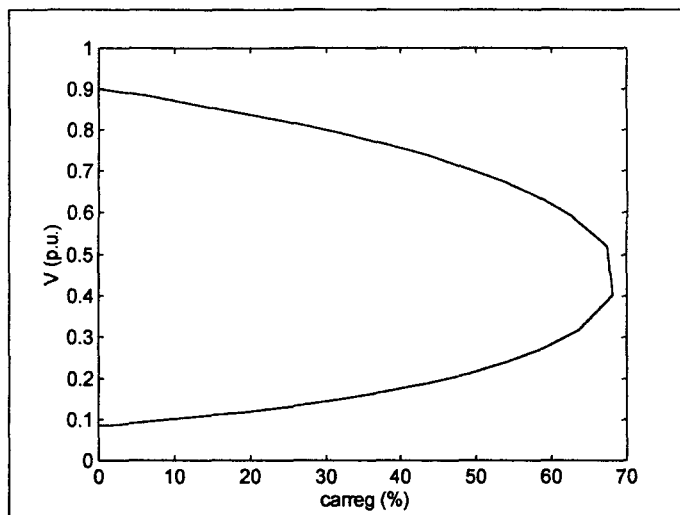


Figura 4.17. Curva P-V completa para barra 31 do sistema de 57 barras, sem limite de reativo

A Figura 4.18 descreve o diagrama de bifurcação, curva Q-V, para barra 31, identificada como crítica pelo critério de menor tensão e pelo critério do vetor tangente, para o sistema de 57 barras.

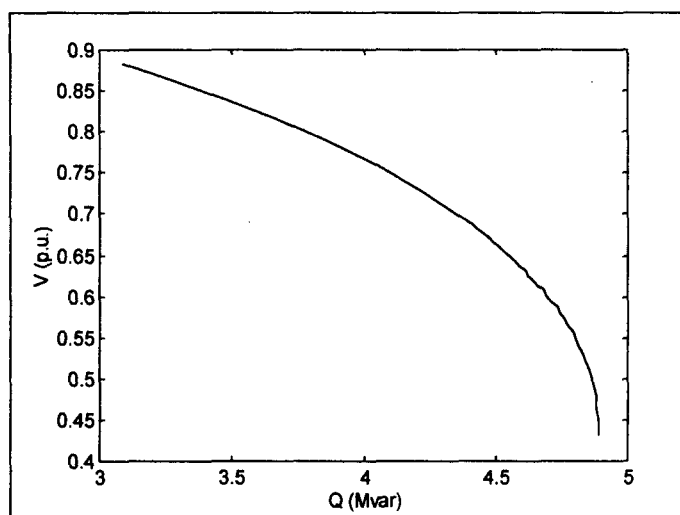


Figura 4.18. Curva Q-V para barra 31 do sistema de 57 barras, sem limite de reativo

A precisão da solução na etapa de predição, nas abordagens “A” e “B” foi semelhante. O número de correções, quando necessárias, não passaram de duas iterações. O número total de iterações do Método da Continuação para obter-se o máximo carregamento, nas duas abordagens, foi o mesmo.

O condicionamento numérico, no último ponto de carregamento obtido pelo Método da Continuação, das matrizes envolvidas neste cálculo, nas duas abordagens do Método da Continuação em coordenadas retangulares, é apresentado na Tabela 4.10. Percebe-se que a matriz Jacobiana aumentada possui melhor condicionamento numérico do que a Jacobiana convencional, o que justifica o Método da Continuação como ferramenta apropriada para o cálculo do máximo carregamento. Em relação as duas abordagens, estas apresentaram resultado semelhante, como se pode ver na Tabela 4.10.

	λ	Jacobiana Convencional	Jacobiana Predição	Jacobiana Correção
Abordagem “A”	27,42	116.381,27	28.000,68	-----
Abordagem “B”	27,16	45.664,73	27.202,73	66.302,54 / 3.150,23

Tabela 4.10. Número de Condicionamento das matrizes Jacobiana convencional, de predição e de correção, do sistema de 57 barras sem limite de reativo

Para avaliar o efeito do nível de tensão das barras de geração no máximo carregamento, realizou-se outro teste. Alterando-se as condições iniciais das tensões nas barras de geração para 1,0 pu, o percentual de carregamento obtido passou de 68,53% para 67,62%, inalterando a tensão na barra crítica. Alterando as tensões para 1,05 pu o carregamento foi para 81,19%. A tensão na barra crítica do sistema que para os dados iniciais era de 0,432 pu passou para 0,443 pu. O aumento da tensão nas barras de geração, de 1,0 para 1,05 pu, fez com que o máximo carregamento obtido fosse superior, assim como, as tensões finais nas barras de carga. Fato este justificado pelo aumento do fluxo ativo e reativo nas linhas de transmissão, visto que os fluxos são diretamente proporcionais às tensões geradas.

Efeito dos Tapes

Através do FLUPOT com a função objetivo *máximo carregamento* e utilizando os tapes como variáveis de otimização, obteve-se outra condição de máximo carregamento. O carregamento obtido pelo sistema foi de 71,62% enquanto que com os tapes fixos o carregamento foi de 69,61%, para os mesmos dados iniciais. O nível das tensões finais nas barras de carga, com os tapes variáveis foram superiores se comparadas à situação com os tapes fixos.

Para complementar esta análise, os valores finais dos tapes, obtidos no FLUPOT, são especificados nos dados do sistema de 57 barras e simulados no programa do Método da Continuação em coordenadas retangulares. O máximo carregamento obtido foi de 70,60%. As tensões nas barras mais críticas (barras 31, 33, 32 e 30) tiveram o perfil superior mesmo com o aumento no máximo carregamento.

Efeito do Despacho de Potência Ativa

O efeito do despacho de potência ativa, na condição de máximo carregamento, distribuindo-se a geração de potência ativa entre a barra de folga e as barras de geração do tipo PV (barras 2, 3, 6, 8, 9 e 12), aumentando-se em 40% a geração ativa de cada barra PV, é apresentado na Tabela 4.11.

	Carreg.	Barra 1 (folga)	Barra 2	Barra 3	Barra 6	Barra 8	Barra 9	Barra 12
Caso Base	68,53%	1888,14	90,10	90,40	70,00	180,00	140,00	100,00
Despacho de Pot. Ativa	74,75%	1551,09	126,14	126,56	98,00	252,00	196,00	140,00

Tabela 4.11. Resultados finais de geração de potência ativa para o sistema de 57 barras, sem limite de reativo

Pode-se observar na Tabela 4.11 que o aumento na geração ativa provocou um aumento, no máximo carregamento, de aproximadamente 6%, demonstrando que o máximo carregamento é sensível ao despacho de potência ativa. Os maiores valores de fluxo de potência ativa, com a geração ativa nas barras PV com os dados do caso base, eram nas linhas de transmissão 1-2, 1-15, 1-16, 1-17 e 2-3, com a mudança da geração ativa o fluxo nas linhas 1-2, 1-15, 1-16, 1-17 e 2-3 diminuiu, ver

Tabela 4.12. Os fluxos ativo e reativo nas linhas que ligam as barras PV às barras de carga, por sua vez, aumentaram. Isto mostra que o aumento na geração ativa fez com que as barras PV passassem a suprir uma parcela maior da demanda total do sistema, enquanto que a demanda suprida pela barra de folga (barra 1) diminuiu.

Geração Ativa	LT 1-2	LT 1-15	LT 1-16	LT 1-17	LT 2-3
Caso base	441,01 MW	639,72 MW	361,79 MW	390,61 MW	511,13 MW
Despacho de Pot. Ativa	293,13 MW	537,27 MW	318,90 MW	346,79 MW	407,30 MW

Tabela 4.12. Fluxos ativos nas linhas de transmissão do sistema de 57 barras, sem limite de reativo

Efeito da Compensação de Potência Reativa

Utilizou-se o FLUPOT com as funções objetivo *mínima alocação de potência reativa shunt* e *máximo carregamento*, para as mesmas condições usadas no sistema de 14 barras, ou seja, limite de operação das tensões entre 0,95 e 1,05 pu. O programa FLUPOT alocou 9,5 Mvar na barra 31 e 3,9 Mvar na barra 33, que são as duas barras com menor tensão no máximo carregamento.

Com os valores das tensões finais obtidas nas barras PV pelo FLUPOT e com as fontes de compensação reativa alocadas, simulou-se o programa para cálculo do máximo carregamento pelo Método da Continuação. Para efeito de comparação, registraram-se os resultados obtidos para o sistema operando sem compensação e para o sistema operando com compensação reativa. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.13.

	Carregamento	Tensão na barra 31	Tensão na barra 33
Sem compensação	77,74%	0,447 pu	0,514 pu
Com compensação	82,61%	0,479 pu	0,533 pu

Tabela 4.13. Resultados para o sistema de 57 barras sem limite de reativo, com e sem alocação de compensação de reativo

Pelos resultados, percebe-se que a alocação de fontes de compensação de potência reativa além de ter permitido um maior carregamento para o sistema, melhorou o perfil de tensão nas barras críticas, ver Figura 4.19.

Como o colapso de tensão é definido como uma deficiência de potência reativa, se fontes de potência reativa forem corretamente alocadas e operadas, o colapso de tensão ocorrerá em um nível maior de carregamento do que sem estas, justificando o resultado apresentado acima.

Na Figura 4.19 apresenta-se a curva P-V para a barra 31 do sistema IEEE – 57 barras, com alocação de fontes de potência reativa.

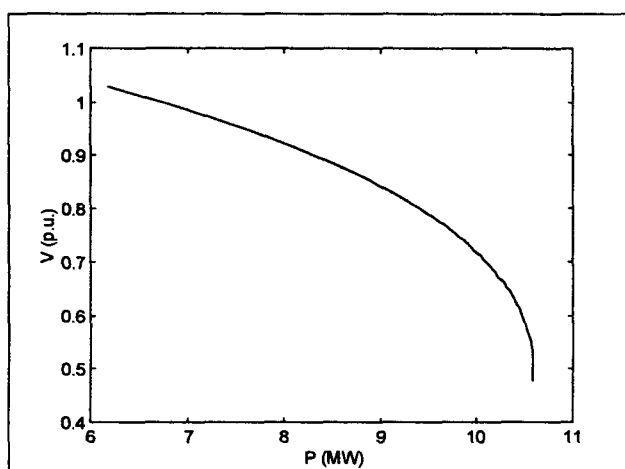


Figura 4.19. Curva P-V para barra 31 do sistema de 57 barras, sem limite de reativo, com alocação de compensação reativa shunt

Comparando-se com o gráfico da Figura 4.16, percebe-se que o nível de tensão obtido no último ponto convergido, é superior ao obtido sem alocação de compensação reativa.

Também para este sistema foi feito o estudo, através do programa FLUPOT, com a função objetivo *mínima perda*. Limitaram-se as tensões entre 0,90 e 1,05 pu, obtiveram-se os valores de tensão a serem especificados nos programas do Método da Continuação. Para este sistema, diferente do que ocorreu para o sistema de 14 barras, foi necessário diminuir o limite inferior de tensão para 0,90 pu no FLUPOT, pois para 0,95 pu não obteve-se convergência no programa de otimização.

O carregamento obtido pelo Método da Continuação foi de 68,11% e a tensão na barra crítica pelo critério de menor tensão, barra 31, foi de 0,434 pu.

Em relação aos dados do caso base, o resultado obtido foi semelhante (o carregamento era de 68,53% e a tensão na barra crítica de 0,499 pu). Para este sistema, não houve diferença entre as perdas ativas e reativas obtidas pelo programa com dados para mínima perda e pelos dados normais.

Outro Estudo

Para outra configuração do sistema, com aumento linear das cargas ativa e reativa e com incremento da geração ativa nas barras PV, o comportamento do sistema de 57 barras foi analisado.

O carregamento passou para 79,53% contra os 68,53% obtidos com a geração ativa nas barras PV fixa. Para esta configuração, o incremento na potência ativa gerada das barras PV, ocasionou um aumento do carregamento máximo obtido para o sistema de 57 barras. Houve uma alteração dos fluxos ativos e reativos nas linhas de transmissão, possibilitando a obtenção de um maior carregamento para o sistema e, além disso, o nível das tensões nas barras críticas foi alterado. Isto indica que o aumento da geração nas barras PV poderia deslocar a área crítica para uma outra área do sistema, ou mesmo, uniformizar o comportamento do sistema para uma sobrecarga.

4.5.2 Com Limite de Potência Reativa

Caso Base

O caso base consiste em sobrecarregar uniformemente o sistema, mantendo constante o fator de potência e geração ativa nas barras PV.

Os resultados obtidos, considerando os limites de geração de potência reativa nas barras PV, nas abordagens “A” e “B” foram semelhantes, o percentual de carregamento foi de 25,27% e 25,23%, respectivamente. O programa PFLOW e o programa FLUPOT apresentaram, também, resultados semelhantes, 25,74% e 25,40%, respectivamente.

A queda no carregamento final, se comparado com o sistema operando sem limites de potência reativa, é devido ao esgotamento de suprimento de potência reativa das barras PV, pois todas as barras do sistema atingiram o limite superior de

potência reativa. Novamente percebe-se que, quando os limites de potência reativa são atingidos o colapso de tensão ocorre em um menor carregamento.

Os perfis de tensão inicial e final, para o último ponto convergido, para o sistema IEEE – 57 barras, com limites de potência reativa, estão apresentados na Figura 4.20.

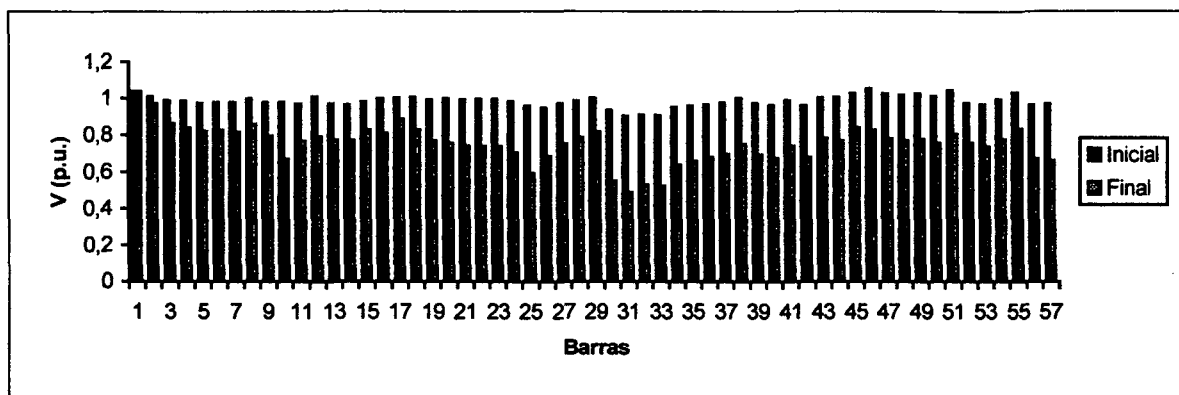


Figura 4.20. Perfis de tensão inicial e final para o sistema IEEE – 57 barras, com limite de potência reativa

A barra crítica, pelo critério de menor tensão e pelo critério de maior componente no vetor tangente de predição no ponto de máximo carregamento, para o sistema operando com limites de potência reativa, foi também a barra 31. A curva P-V, obtida pelo Método da Continuação, para esta barra pode ser observada na Figura 4.21. As tensões finais nas barras de carga com o sistema operando com limites de reativo foram inferiores aos obtidos no caso não limitado. Como já mencionado, se o limite superior de potência reativa for atingido, a tensão tende a cair devido à insuficiência de suporte de potência reativa.

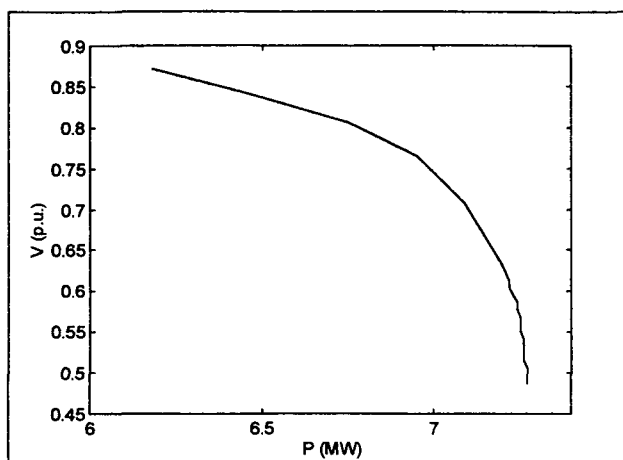


Figura 4.21. Curva P-V da barra 31 do sistema de 57 barras, com limite de reativo

Comparando-se esta curva com a obtida através do programa PFLOW, na Figura 4.22, mostra-se mais uma vez a concordância dos dois programas.

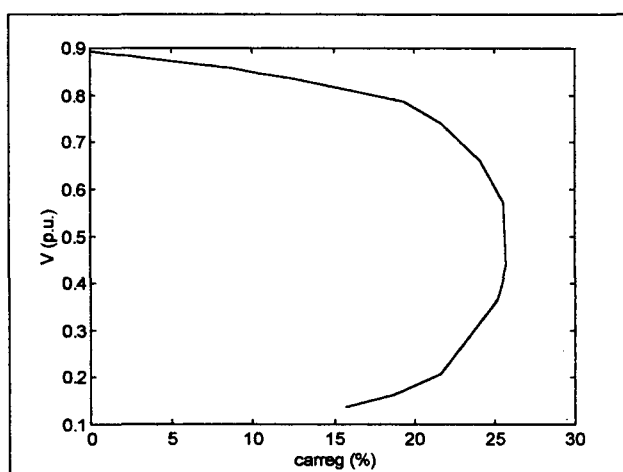


Figura 4.22. Curva P-V da barra 31 do sistema de 57 barras obtido pelo PFLOW, com limite de reativo

O comportamento da tensão na barra 31 para o sistema operando com limites de potência reativa, representado através da curva Q-V, é apresentado na Figura 4.23.

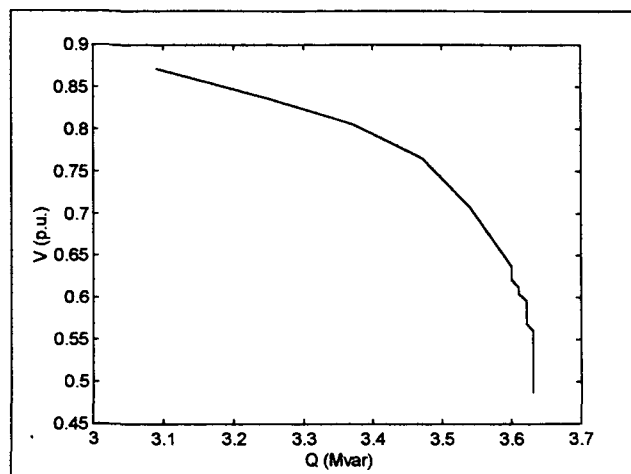


Figura 4.23. Curva Q-V da barra 31 do sistema de 57 barras, com limite de reativo

O condicionamento numérico das matrizes envolvidas no cálculo do máximo carregamento, pelo Método da Continuação, nas duas abordagens, é apresentado na Tabela 4.14.

	λ	Jacobiana Convencional	Jacobiana Predição	Jacobiana correção
Abordagem "A"	10,1083	37.690.357,40	4.932,70	-----
Abordagem "B"	10,0906	96.781,71	4.979,77	3.999,55

Tabela 4.14. Número de Condicionamento das matrizes Jacobiana convencional, de predição e de correção, do sistema de 57 barras com limite de reativo

Durante o processo iterativo do Método da Continuação, a Jacobiana das etapas de predição e correção, em algumas iterações, tiveram o número de condicionamento superior ao da Jacobiana convencional, mas quando próximo do máximo carregamento o condicionamento das matrizes de predição e correção foi inferior, como pode ser visto na Tabela 4.14.

Também para o sistema com limites de potência reativa gerada nas barras PV, avaliou-se o efeito do nível de tensão das barras de geração no máximo carregamento, alterando-se as condições iniciais destas.

Primeiro, colocaram-se as tensões nas barras de geração em 1,0 pu. O percentual de carregamento obtido foi de 20,68%, sendo que o carregamento com os dados iniciais era de 25,27%. Alterando-se para 1,05 pu o carregamento passou para 29,32%.

A tensão na barra crítica, barra 31, com a tensão nas barras de geração em 1,0 pu passou de 0,487 pu para 0,501 pu; e com a tensão nas barras de geração em 1,05 pu passou para 0,516 pu.

Estes resultados demonstram a importância da tensão nas barras de geração para a condição de máximo carregamento. O aumento da tensão alterou os fluxos nas linhas de transmissão e, com isso, modificou o carregamento final para este sistema e também, o nível das tensões finais.

Efeito dos Tapes

O efeito da alteração dos valores dos tapes no sistema IEEE – 57 barras, obtidos através do programa FLUPOT, operando com limites de potência reativa nas barras PV foi o seguinte: o percentual de carregamento obtido foi semelhante ao sistema com os valores iniciais de tapes, era de 25,27% e passou para 24,72%.

A tensão nas barras de carga é que foram modificadas, os perfis de tensão finais obtidos foram superiores. Isto demonstra que o ajuste nos valores dos tapes pode modificar uma situação de instabilidade de tensão numa dada região, sem ter que alterar a geração no sistema.

Efeito do Despacho de Potência Ativa

O efeito do despacho de potência ativa, na condição de máximo carregamento, distribuindo-se a geração de potência ativa entre a barra de folga e as barras de geração do tipo PV, aumentando-se em 40% a geração ativa de cada barra é apresentado na Tabela 4.15.

	Carreg.	Barra 1 (folga)	Barra 2	Barra 3	Barra 6	Barra 8	Barra 9	Barra 12
Caso Base	25,27%	1074,47	90,10	90,40	70,00	180,00	140,00	100,00
Despacho de Pot. Ativa	25,18%	693,93	126,14	126,56	98,00	252,00	196,00	140,00

Tabela 4.15. Resultados finais de geração de potência ativa para o sistema de 57 barras, com limite de reativo

Pode-se observar que o carregamento final obtido, para esta condição, foi semelhante ao do caso base. Os perfis de tensões finais, na área crítica, tiveram valores superiores, devido à alteração nos fluxos ativos e reativos nas linhas de transmissão. A respeito da barra de folga, esta teve a sua geração ativa reduzida, em mais de 40%, não foi portanto, tão exigida pelo sistema para condição de sistema sobrecarregado.

4.6 SISTEMA IEEE – 118 BARRAS

Apresentam-se a seguir os resultados obtidos analisando-se o sistema IEEE-118 barras. Novamente, optou-se por sobrecarregar uniformemente o sistema, mantendo-se desta forma o fator de potência, com e sem aumento na geração ativa nas barras PV.

4.6.1 Sem Limite de Potência Reativa

Caso Base

O caso base, conforme já mencionado, consiste no aumento das cargas ativas e reativas de todas as barras mantendo-se constante o fator de potência, sem incremento da potência ativa.

Para este caso o carregamento obtido foi de 65,45% nas abordagens “A” e “B”, enquanto que o carregamento obtido pelo PFLOW foi semelhante, 66,05%.

As barras identificadas como críticas pelo critério do vetor tangente, nas abordagens “A” e “B”, foram as barras 23, 71, 22, 32, 114, 115, 28, 21, 29 e 20, nesta

ordem. Pelo critério de menor tensão, no último ponto convergido, foram as barras 74, 118, 76, 75, 70, 43 e 36 (tensões abaixo de 0,8 pu). O PFLOW, classificou as barras 76, 118, 43, 74, 75, 44, 36 e 35. Percebe-se claramente a existência de uma área crítica formada pelas barras 20, 21, 22, 23, 28 e 29.

Como já mencionado anteriormente, o programa PFLOW identifica as barras críticas na primeira iteração do método. Algumas vezes, a barra identificada como crítica na primeira iteração não é a barra crítica quando o sistema é sobrecarregado. Para este sistema de 118 barras, o Método da Continuação classificou a barra 23 como crítica apenas nas últimas iterações.

Nos gráficos das Figuras 4.24 e 4.25, são apresentadas as curvas P-V para duas barras do sistema de 118 barras, as barras 23 e 74, sendo que a primeira foi identificada como crítica pelo critério do vetor tangente e a segunda, pelo critério de menor tensão.

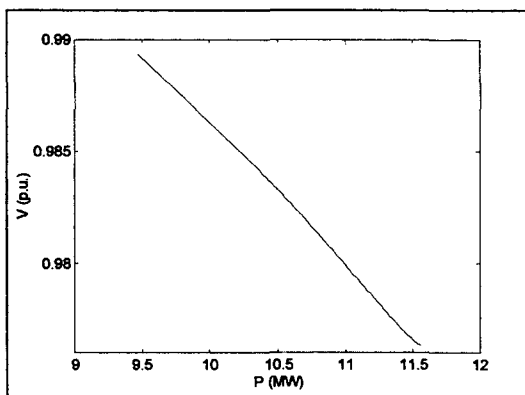


Figura 4.24. Curva P-V da barra 23 do sistema de 118 barras, sem limite de reativo

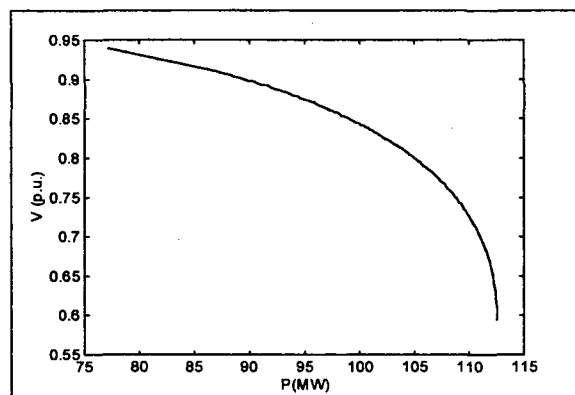


Figura 4. 25. Curva P-V do barra 74 do sistema de 118 barras, sem limite de reativo

Através do gráfico na Figura 4.26 pode-se observar as tensões iniciais e finais das barras sujeitas à instabilidade de tensão, pelo critério do vetor tangente e, também, da barra de menor tensão no último ponto convergido, barra 118.

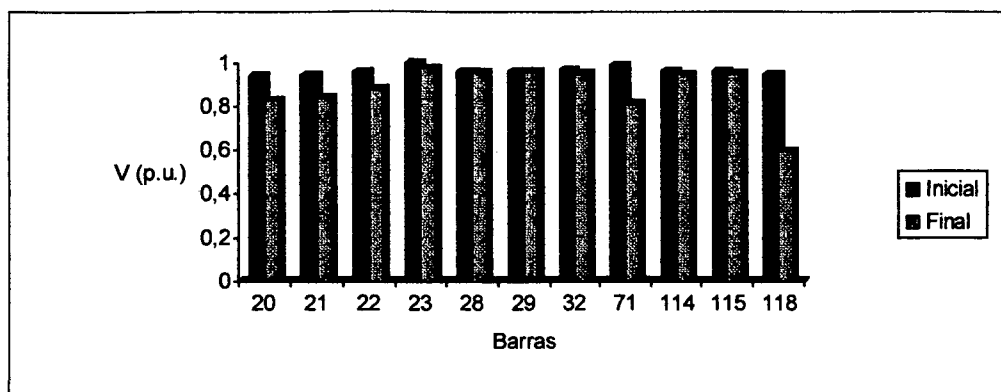


Figura 4.26. Tensões inicial e final para as barras do sistema de 118 barras, sem limite de reativo

A respeito do condicionamento numérico das matrizes Jacobianas envolvidas no cálculo do máximo carregamento, pelo Método da Continuação, os resultados são apresentados na Tabela 4.16. Comparando, percebe-se que no último ponto convergido o condicionamento numérico das matrizes Jacobiana de predição e correção é inferior ao condicionamento numérico da Jacobiana convencional. Isto é favorável pois, como já mencionado, o número de condicionamento pode dar uma indicação da condição da matriz Jacobiana “com respeito à inversão”. O número de condicionamento pode ser usado como uma medida da proximidade à singularidade da Jacobiana do fluxo de carga. No ponto de colapso de tensão, o número de condicionamento tende a infinito. Assim, pode-se verificar que o fato de se acrescentar uma equação ao sistema de equações não-lineares do fluxo de carga, nas abordagens “A” ou “B”, melhorou o condicionamento numérico da matriz Jacobiana.

	λ	Jacobiana Convencional	Jacobiana Predição	Jacobiana Correção
Abordagem “A”	26,18	609.405,92	53.102,81	7.660,15
Abordagem “B”	26,18	656.908,72	51.782,77	9.061,06

Tabela 4.16. Número de condicionamento das matrizes Jacobiana convencional, da predição e da correção, do sistema de 118 barras sem limite de reativo

Para avaliar o efeito do nível de tensão nas barras de geração sobre a condição de máximo carregamento, fez-se o seguinte teste: alterou-se primeiro, a tensão

em todas as barras PV para 1,0 pu e depois, para 1,05 pu, observando-se o carregamento obtido e o perfil de tensão final nas barras críticas.

O percentual de carregamento obtido, para as tensões em 1,0 pu, foi de 137,16%. No PFLOW o carregamento obtido foi semelhante, 136,90%. Como o carregamento obtido foi bem superior ao com dados normais, as tensões nas barras críticas foram inferiores.

O percentual de carregamento para tensões em 1,05 pu foi de 162,43%. Pelo PFLOW foi de 162,33%. A tensão nas barras críticas, se comparadas com as tensões nas barras de geração em 1,0 pu, forem superiores. Houve um aumento do fluxo de potência nas linhas de transmissão ligadas as barras de geração, o que proporcionou um maior carregamento para o sistema.

Outro Estudo

Outra configuração utilizada foi o incremento das cargas ativas e reativas de todas as barras, mantendo constante o fator de potência, e incrementando a geração ativa nas barras PV.

O carregamento obtido, nesta configuração, foi de 103,10% nas abordagens “A” e “B”, enquanto que para o PFLOW foi de 102,90%. Comparando-se com os resultados com a geração ativa fixa nas barras PV, houve um aumento no carregamento final.

As barras identificadas como críticas pelo critério do vetor tangente e pelo critério de menor tensão, no último ponto convergido, foram as barras 76, 118, 74, 75, 84, 88, 85 e 83. Formou-se uma outra área crítica para esta situação, diferente da obtida para configuração de potência ativa fixa.

Não é apresentado neste item o resultado obtido através do programa FLUPOT, pois para este sistema IEEE – 118 barras seriam necessários fazer ajustes para convergência do método de otimização. O número de iterações excedeu o limite estipulado pelo programa e as condições de convergência não foram satisfeitas. Assim, não foi possível testar a função objetivo de máximo carregamento. O mesmo ocorreu para o sistema operando com limites de potência reativa.

4.7.1 Com Limite de Potência Reativa

Caso Base

Os resultados obtidos, com limites de potência reativa gerada nas barras PV, para o sistema configurado para um aumento das cargas ativas e reativas de todas as barras mantendo-se constante o fator de potência, sem incremento da potência ativa nas barras PV, caso base, são apresentados abaixo.

Para este caso, o carregamento obtido foi de 28,20% nas abordagens “A” e “B”, enquanto que o carregamento obtido pelo PFLOW foi de 27,47%.

As barras identificadas como críticas pelo critério do vetor tangente, nas abordagens “A” e “B”, foram as barras 41, 40, 42, 39, 53, 43, 52, 44, 54, 55, 56 e 58, nesta ordem. Pelo critério de menor tensão, no último ponto convergido, foram as barras 53, 44, 52, 54, 41, 55, 43, 56 e 58 (tensões abaixo de 0,75 pu). O PFLOW, classificou as barras 43, 36, 35, 34, 76, 118, 37 e 33.

Os níveis de tensão obtidos para a carga inicial e final, das barras sujeitas à instabilidade de tensão, são apresentados na Figura 4.27.

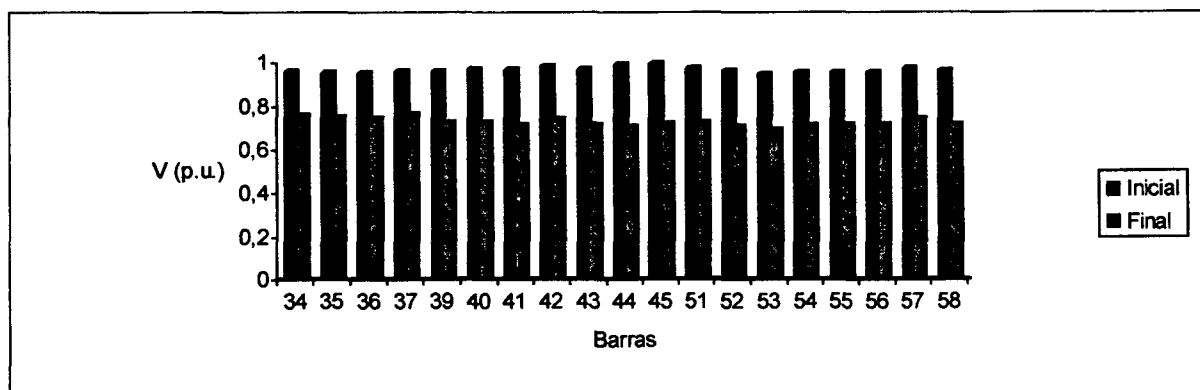


Figura 4.27. Tensões inicial e final das barras do sistema de 118 barras, com limite de reativo

Para este caso, a monitoração das barras críticas durante o carregamento do sistema indica a existência de uma grande área crítica, formada pelas barras do gráfico da Figura 4.27.

Nos gráficos das Figuras 4.28 e 4.29 apresenta-se as curvas P-V de duas barras do sistema, barras 41 e 53.

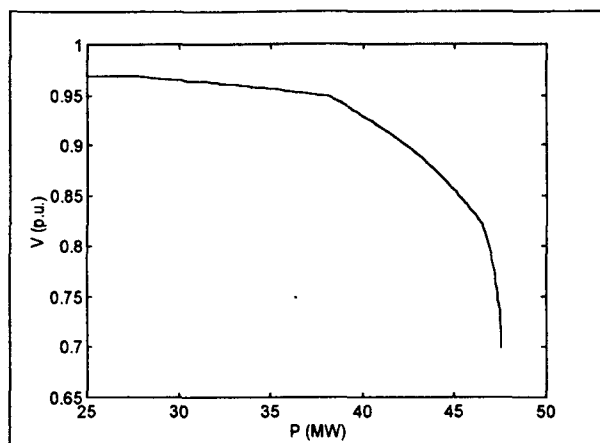


Figura 4.28. Curva P-V da barra 41 do sistema de 118 barras, com limite de reativo

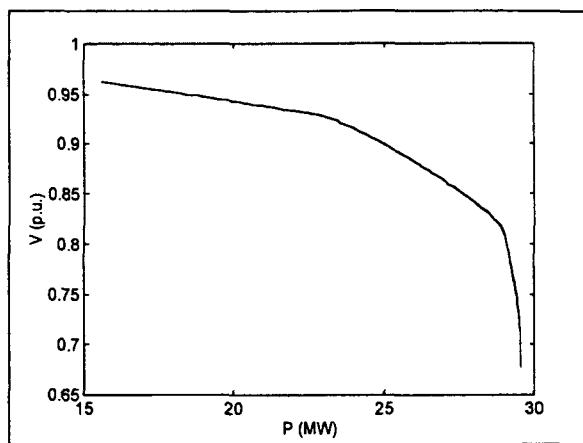


Figura 4.29. Curva P-V da barra 53 do sistema de 118 barras, com limite de reativo

O condicionamento numérico das matrizes utilizadas para o cálculo do máximo carregamento, para o sistema com limites de potência reativa gerada, estão na Tabela 4.17.

	λ	Jacobiana Convencional	Jacobiana Predição	Jacobiana Correção
Abordagem "A"	26,18	1207.910,17	11.447,35	11.428,65
Abordagem "B"	26,18	2.660.830,09	11.445,81	8.406,09

Tabela 4.17. Número de condicionamento das matrizes Jacobiana convencional, de predição e de correção, do sistema de 118 barras com limite de reativo

Pode-se, novamente, constatar que a inclusão de uma equação, tanto pela abordagem "A" quanto pela abordagem "B", na matriz Jacobiana convencional, afetou o condicionamento numérico desta. Comparando-se com o número de condicionamento da Jacobiana Convencional, na Tabela 4.17, as matrizes Jacobiana da etapa de predição e da etapa de correção são mais bem-condicionadas.

Outro Estudo

Outra configuração utilizada foi o incremento das cargas ativas e reativas de todas as barras, mantendo constante o fator de potência, e incrementando a geração ativa nas barras PV.

O carregamento obtido, nesta configuração, foi de 54,71% nas abordagens “A” e “B”, enquanto que para o PFLOW foi de 54,46%. Comparando-se com os resultados com a geração ativa fixa nas barras PV, houve um aumento no carregamento final.

As barras identificadas como críticas pelo critério do vetor tangente e pelo critério de menor tensão, no último ponto convergido, foram as barras 41, 40, 42, 39, 43, 36, 35, 44 e 34. Para este caso, a área crítica manteve-se semelhante à obtida para configuração de potência ativa fixa. Isto deve-se ao fato de que mesmo com o aumento da geração nas barras PV, houve esgotamento das fontes de reativo nesta área, causando o declínio das tensões.

4.7 SISTEMA SUL-SUDESTE REDUZIDO – 176 BARRAS

Os resultados apresentados a seguir são de um sistema real, Sistema Sul-Sudeste. Neste trabalho este sistema é um equivalente reduzido com 176 barras do sistema real.

Conforme foi apresentado nos outros sistemas, a forma de análise a ser adotada para o estudo de estabilidade de tensão é uma sobrecarga uniforme no sistema, aumentando sua carga ativa e reativa, mantendo desta forma o fator de potência típico, com e sem incremento na potência ativa gerada das barras PV.

Os resultados das análises estão divididos em duas partes: sem limite de potência reativa e com limite de potência reativa gerada.

Para este sistema não foi possível utilizar o programa FLUPOT, pois o mesmo é limitado a sistemas de até 150 barras.

4.7.1 Sem Limites de Reativo

Caso Base

O primeiro teste, assim como para os outros sistemas, consiste no aumento das cargas ativas e reativas de todas as barras, mantendo-se constante o fator de potência, sem incremento da geração ativa.

Para este caso o carregamento obtido pelas abordagens “A” e “B” foi de 33,28% e 33,90%, respectivamente, enquanto que para o PFLOW foi de 33,32%. Os níveis de tensão obtidos para a carga inicial e para a carga final de algumas barras do sistema, no máximo carregamento, são apresentados a seguir, na Figura 4.30.

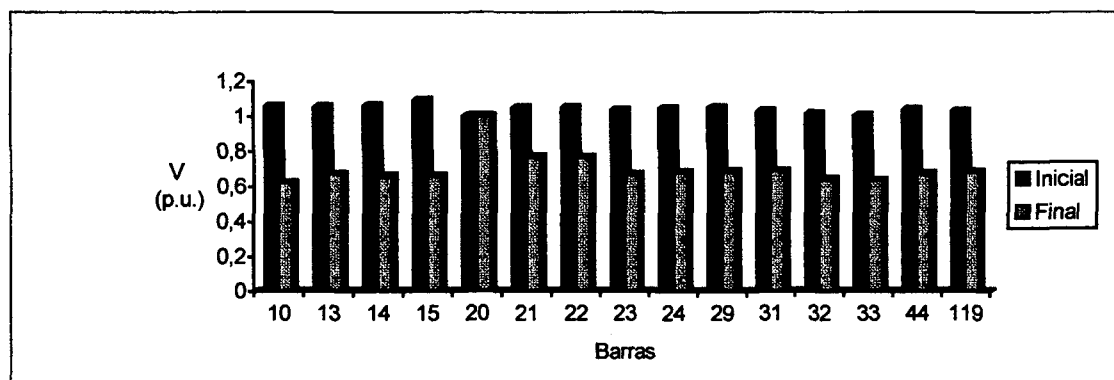


Figura 4.30. Tensões finais e iniciais das barras do sistema de 176 barras, sem limite de reativo

As barras identificadas como críticas pelo critério de maior incremento no vetor tangente de predição, pelo Método da Continuação, tanto pela abordagem “A” quanto pela “B”, foram as barras 10, 15, 14, 33, 32, 24, 13, 22, 21 e 23, nesta ordem. A classificação obtida pelo PFLOW e pelo critério de menor tensão foram diferentes. A Tabela 4.18 mostra a ordem de classificação das barras mais críticas, para o sistema sem limites de potência reativa, no último ponto convergido, através das três formas disponíveis

Barras	10	15	14	33	32	24	13	22	21	23
Vetor Tangente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PFLOW	2	1	5	8	---	---	7	3	4	---
Menor tensão	1	4	5	2	3	10	7	---	---	6

Tabela 4.18. Classificação das barras mais críticas no último ponto convergido, do sistema de 176 barras sem limite de reativo

A região mais sujeita ao colapso de tensão, neste sistema, possui uma pequena carga reativa mas as fontes de geração reativa estão distantes (não conectadas diretamente) dessa região, fazendo com que o nível de tensão seja baixo.

Nas figuras abaixo estão apresentadas as curvas P-V para as barras 10 e 15, classificadas como mais críticas pelos três critérios (PFLOW, menor tensão e maior componente do vetor tangente de predição).

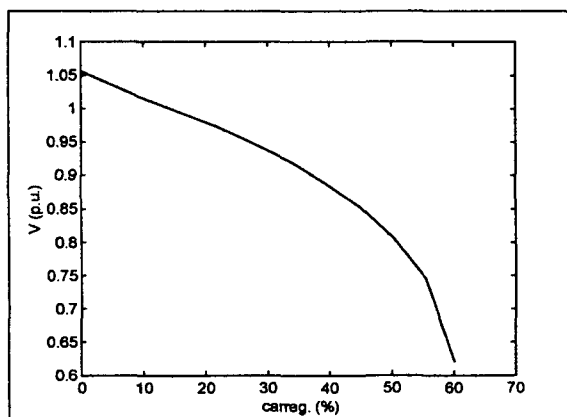


Figura 4.31. Curva P-V da barra 10 do sistema de 176 barras, sem limite de reativo

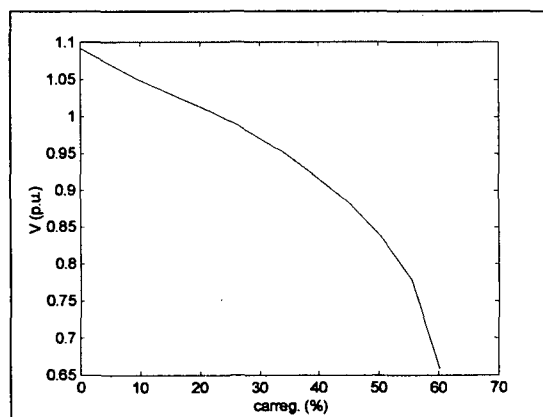


Figura 4.32. Curva P-V da barra 15 do sistema de 176 barras, sem limite de reativo

O condicionamento numérico das matrizes Jacobiana convencional, Jacobiana da etapa de predição e da Jacobiana da etapa de correção, está apresentado na Tabela 4.19.

	λ	Jacobiana Convencional	Jacobiana Predição	Jacobiana Correção
Abordagem "A"	47,9259	5.672,81	4.940.923,77	7.702.646,71 7.911.381,77
Abordagem "B"	49,0035	8.172,77	8.413.377,63	41.740,08 11.147,72

Tabela 4.19. Condicionamento numérico da matriz Jacobiana convencional, de predição e de correção, do sistema de 176 barras, sem limites de potência reativa

Para este sistema, em especial, a adição de uma linha na matriz Jacobiana, tanto na etapa de predição quando na etapa de correção, não afetaram positivamente o condicionamento numérico dessas matrizes. Para comprovar este resultado, fez-se o seguinte teste: os resultados do máximo carregamento (tensões, cargas, etc) foram utilizados num programa de fluxo de carga e observado o condicionamento numérico da matriz Jacobiana convencional. O resultado obtido mostra que o condicionamento numérico desta matriz, com o sistema sobrecarregado, é melhor do que na partida do processo de carregamento do sistema, como pode-se ver na Tabela 4.20.

Condic. da J convencional com dados do caso base	Cond. da J convencional com dados do máximo carregamento
9.541,42	10.161,85
19.414,48	10.377,42
19.268,04	30.183,97
	13.112,49
	16.226,23
	5.404,22

Tabela 4.20. Condicionamento numérico da matriz Jacobiana convencional, com dados do caso base e com dados do máximo carregamento, para o sistema de 176 barras

O perfil das tensões na condição de máximo carregamento, para este sistema, mesmo com a equação adicionada à matriz Jacobiana na etapa de predição e na etapa de correção, nas duas abordagens, não melhorou o condicionamento numérico desta matriz, como era o esperado.

Outro Estudo

Outra configuração utilizada foi a sobrecarga uniforme do sistema, mantendo constante o fator de potência, com incremento da geração ativa nas barras PV.

O carregamento obtido foi de 38,85%. No PFLOW o carregamento foi semelhante, 38,57%.

As barras identificadas como críticas pelo critério do vetor tangente, nesta configuração, foram as barras 10, 15, 14, 33, 32, 13, 24, 23, 29, 44, 22, 21, 31, 30 e 28. Comparando-se com as barras identificadas como críticas, para o sistema com a geração ativa fixa, percebe-se que não houve alteração na área crítica.

Neste estudo observa-se, que apesar de ser obtida uma margem de carregamento um pouco maior do que para o caso base, as barras críticas não modificaram-se. Isto pode ser explicado pelo número e localização dos geradores no sistema de 176 barras. As barras identificadas como críticas não estão ligadas diretamente a nenhuma barra de geração, ou seja, estão distantes das fontes de geração do sistema.

Observa-se através do comportamento das tensões mostrada nas várias formas de análise, que o perfil de todas as tensões críticas tem um comportamento semelhante, isto é devido às barras estarem localizadas em uma mesma região sujeita ao colapso, e suas fontes de reativos serem comuns e não tendo condições de suportar seus níveis de tensão.

4.7.2 Com limites de Potência Reativa

Caso Base

Assim como para os outros sistemas estudados, o caso base consiste na sobrecarga uniforme em todo o sistema, mantendo constante o fator de potência, e a geração ativa nas barras PV fixa.

Os resultados obtidos, considerando os limites de geração de potência reativa nas barras PV, nas abordagens “A” e “B” foram semelhantes, o máximo

carregamento foi de 18,67% e 18,60%, respectivamente. O programa PFLOW apresentou resultado semelhante, 19,10%. Os níveis de tensão obtidos para a carga inicial e para a carga final, no máximo carregamento, para algumas barras, são apresentados na Figura 4.33.

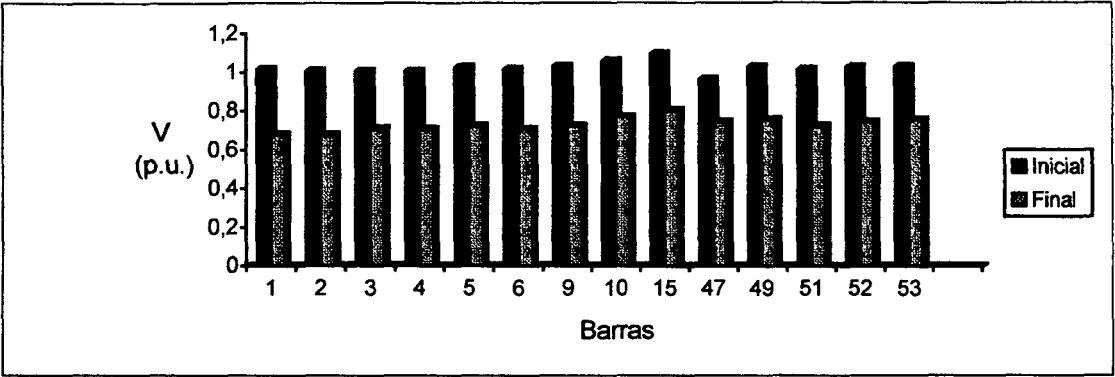


Figura 4.33. Tensões inicial e final para as barras críticas do sistema de 176 barras, com limites de potência reativa

As barras identificadas como críticas pelo critério de maior incremento no vetor tangente de predição, pelo Método da Continuação, tanto pela abordagem “A” quanto pela “B”, foram as barras 1, 2, 6, 9, 5, 50, 4, 3, 51, 49, 53, 52, 10, 15 e 47, nesta ordem. A classificação obtida pelo PFLOW e pelo critério de menor tensão foram diferentes. A Tabela 4.21 mostra a ordem de classificação das barras mais críticas, para o sistema sem limites de potência reativa, no último ponto convergido, através das três formas disponíveis.

Barras	1	2	6	9	5	50	4	3	51	49
Vetor Tangente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PFLOW	1	2	5	4	7	3	6	8	---	---
Menor tensão	2	1	5	8	7	3	4	6	9	---

Tabela 4.21. Classificação das barras mais críticas no último ponto convergido, do sistema de 176 barras com limite de reativo

As áreas indicadas como críticas para o sistema de 176 barras, com limites de potência reativa gerada nas barras PV, foram diferentes da área indicada como crítica para o sistema sem limites de potência reativa. Algumas barras, dessas

áreas críticas, são diretamente ligadas a barras que atingiram o limite superior de potência reativa gerada. Com isso, houve uma queda brusca na tensão dessas barras devido a insuficiência de suporte de potência reativa.

O PFLOW identifica as barras como críticas apenas na primeira iteração, não reavaliando enquanto o sistema está sendo carregado. Para este sistema, as barras indicadas como críticas no máximo carregamento, não são as mesmas indicadas como críticas durante o processo iterativo, pelo critério do vetor tangente do Método da Continuação. Esta característica depende do sistema e do tipo de estudo efetuado.

Nas figuras abaixo estão apresentadas as curvas P-V para as barras 1 e 2, respectivamente, classificadas como mais críticas pelos critérios do vetor tangente e de menor tensão, no último ponto convergido.

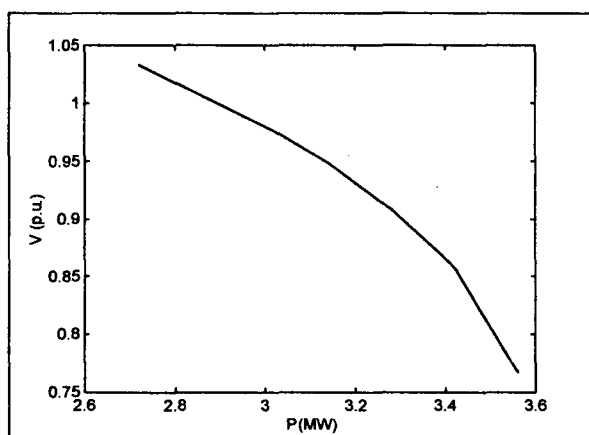


Figura 4.34. Curva P-V da barra 1 do sistema de 176 barras, com limite de reativo

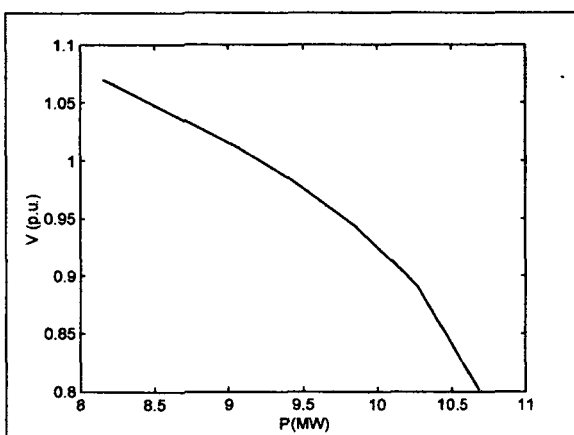


Figura 4.35. Curva P-V da barra 2 do sistema de 176 barras, com limite de reativo

Para estas barras, percebe-se claramente o ponto onde o limite de potência reativa foi atingido, pois houve uma mudança repentina na trajetória da solução.

O condicionamento numérico das matrizes utilizadas no cálculo do máximo carregamento, pelo Método da Continuação, pode ser visto na Tabela 4.22.

	$\lambda_.$	Jacobiana Convencional	Jacobiana Predição	Jacobiana Correção
Abordagem "A"	36,0680	28.060,30	6.668.140,83	11.795,11 133.801,74
Abordagem "B"	38,4007	38.750,16	9.937.670,63	30.023.628,85

Tabela 4.22. Condicionamento numérico da matriz Jacobiana convencional, de predição e de correção, do sistema de 176 barras, com limites de potência reativa

Assim como no sistema operando sem limites de potência reativa, o número de condicionamento da matriz Jacobiana convencional foi menor do que os das matrizes de predição e correção, que foram aumentadas em uma equação.

Outro Estudo

Com a configuração de sobrecarga uniforme em todo sistema e com aumento da geração ativa nas barras PV, fez-se outro teste.

O carregamento obtido foi de 22,46%, no Método da Continuação em coordenadas retangulares, e pelo PFLOW foi de 22,7%. Comparando com o caso em que a geração PV estava fixa, houve um aumento no percentual de carregamento obtido.

Assim, como no sistema sem limites de potência reativa, quando a geração nas barras PV estava fixa, quem supria a geração necessária para gerar potência para suprir as perdas de transmissão (satisfazer as equações de balanço de potência: geração menos demanda e perdas igual a zero) era a barra de folga. Com a geração ativa das barras PV acompanhando o crescimento da carga, a geração na barra de folga, barra 168, foi diferente. Como as outras barras de geração passaram a gerar mais, a participação da barra de folga na função de satisfazer as equações de balanço de potência foi diminuída. Para ilustrar, a potência ativa gerada pela barra de folga, com a geração nas barras PV fixa foi de 1.110,44 MW, e com a geração nas barras PV acompanhando o crescimento da carga, foi de 155,95 MW.

As barras identificadas como críticas pelo critério do vetor tangente e pelo critério de menor tensão, no último ponto convergido, foram as barras 1, 2, 6, 9, 50, 5, 4, 3, 51, 49, 53, 52, 47 e 48. A monitoração das barras críticas durante o carregamento do sistema indica a existência de duas áreas críticas, ou seja, as que sofrerão o maior impacto da instabilidade de tensão. Nota-se que tais barras são indicadas como críticas durante todo o processo de incremento de carga, até a obtenção do último ponto de convergência. Como já citado, esta característica depende do tipo de sistema e do tipo de estudo efetuado.

A indicação das barras críticas obtidas pelo PFLOW, através do autovetor direito para o último ponto convergido antes do ponto crítico, apresentou a

área constituída das barras 1, 2, 50, 9, 6, 4, 5 e 3 (classifica apenas 8 barras), indicando o mesmo que o vetor tangente de predição.

4.8 CONCLUSÃO

Neste capítulo foram apresentados os resultados correspondentes as simulações efetuadas nos sistemas exemplos, IEEE - 14, IEEE - 57, IEEE - 118 e Sul-Sudeste reduzido com 176 barras. Os resultados foram sumarizados na forma de tabelas e gráficos, sendo apresentado, os comentários pertinentes a sua interpretação.

Através dos resultados apresentados neste capítulo e das comparações com outros programas para cálculo do máximo carregamento, as implementações do Método da Continuação em coordenadas retangulares mostraram-se satisfatórias.

Como subproduto do Método da Continuação pode-se obter a indicação das barras mais críticas do sistema, através do vetor tangente de predição.

O conjunto de barras indicadas como críticas, para os sistemas analisados, nem sempre permaneceu o mesmo durante o carregamento. Para os sistemas operando com limites de potência reativa gerada, à medida que as máquinas vão atingindo seus limites de geração de reativo, as barras vão apresentando sensibilidades diferentes das magnitudes de suas tensões, em relação aos aumentos na carga, fazendo com que a área crítica se desloca para outra área.

No último capítulo desta dissertação são apresentadas as conclusões finais desta pesquisa e as sugestões para futuros trabalhos.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÃO

No presente trabalho, estudaram-se os diversos aspectos da determinação do máximo carregamento de um sistema de energia elétrica através do Método da Continuação. O modelo representativo do sistema de potência foram as equações não lineares da rede elétrica expressas em coordenadas retangulares.

Duas técnicas de correção distintas podem ser utilizadas no Método da Continuação: na primeira, o conjunto de equações é aumentado por uma equação especificando o valor de uma das variáveis dependentes do problema; na segunda, uma equação adicional, a qual define o hiperplano perpendicular ao vetor tangente de predição, é incluída no conjunto de equações não lineares a ser resolvido na etapa de correção. Essas técnicas podem conduzir ao ponto de máximo carregamento por trajetórias diferentes. Dependendo da estratégia de correção utilizada, em alguns casos a solução do fluxo de potência na etapa de correção torna-se problemática, devido a problemas de condicionamento numérico.

Subprodutos das etapas intermediárias do processo iterativo, tais como as componentes do vetor tangente de predição, podem ser utilizados como indicadores de barras que potencialmente estão sujeitas a instabilidade de tensão. Os resultados numéricos indicaram uma precisão razoável na indicação dessas barras.

A validade dos algoritmos foi demonstrada através dos exemplos de aplicação aos sistemas-teste do IEEE de 14, 57 e 118 barras, e ao equivalente de um sistema real de 176 barras.

Com base nos resultados obtidos da presente aplicação, o desempenho do algoritmo do Método da Continuação pode ser resumido nos seguintes pontos:

- ◆ O método da continuação na versão implementada mostrou-se preciso na determinação do máximo carregamento quando comparado aos programas PFLOW e FLUPOT;
- ◆ A estratégia de incluir uma equação adicional ao conjunto de equações não lineares da rede elétrica, nas duas abordagens implementadas, nem sempre melhora o condicionamento numérico da matriz Jacobiana quando o sistema está próximo ao ponto de máximo carregamento;
- ◆ Os resultados intermediários obtidos ao longo do processo iterativo permitem a observação do comportamento das variáveis do sistema enquanto o sistema está sendo carregado;
- ◆ O vetor tangente de predição, subproduto das etapas intermediárias do Método da Continuação, fornece uma razoável indicação das barras com problemas de tensão;

Com relação ao vetor tangente de predição, usado como indicador de barras críticas, as seguintes características foram observadas:

- ◆ A indicação da barra crítica com base nas componentes do vetor tangente de predição é uma análise de sensibilidade das variáveis de estado do sistema em relação a um aumento na carga em torno de um ponto de operação. A área indicada como crítica nas soluções próximas ao ponto de demanda máxima é a área crítica do sistema. Esta área determina a região do sistema considerada mais propensa ao colapso de tensão, e onde seria mais indicado haver uma correção de tensão, a fim de atingir um perfil adequado;
- ◆ A barra de menor tensão em magnitude, ao final do processo iterativo, não caracteriza necessariamente a barra mais susceptível aos problemas de instabilidade de tensão;

- ♦ Durante o processo iterativo, as barras que compõem a área crítica podem variar, como foi o caso dos sistemas operando com e sem limites de potência reativa gerada nas barras PV;

A respeito do efeito das variáveis do sistema no máximo carregamento, as seguintes observações podem ser colocadas:

- ♦ O aumento nas tensões das barras de geração fez com que o máximo carregamento obtido fosse superior, assim como a magnitude das tensões nas barras de carga. Estes resultados ilustram a importância do controle da magnitude da tensão nas barras de geração para obter melhores condições de máximo carregamento;
- ♦ O ajuste dos tapes dos transformadores alterou pouco o valor do máximo carregamento. Por outro lado, observaram-se em alguns casos mudanças eventualmente significativas no perfil de tensões;
- ♦ Com relação ao despacho de potência ativa, pode-se concluir o seguinte: quando a geração nas barras PV é mantida fixa, a geração necessária para satisfazer as equações de balanço de potência é suprida basicamente pela barra de folga. Com a geração de potência ativa das barras PV acompanhando a demanda durante o processo iterativo a participação da barra de folga na geração é diminuída, o que tende a facilitar o trânsito da potência ativa da geração à carga. Este procedimento também pode ser utilizado para não sobrecarregar determinadas linhas de transmissão. O aumento da geração nas barras PV pode deslocar a área crítica para um outro local do sistema, ou mesmo uniformizar o comportamento do sistema em termos de magnitude da tensão para uma carga elevada.
- ♦ Quanto ao sistema operado com limites de potência reativa gerada, há uma redução no valor do máximo carregamento, comparado aos sistemas onde não se consideram os limites de potência reativa. Isto é devido ao esgotamento de suprimento de potência reativa nas barras. Se a geração de potência reativa é limitada, a deficiência de reativo no sistema tornará mais próximo o ponto de máximo carregamento;

- ♦ A alocação de compensação de potência reativa, para alguns sistemas, além de ter proporcionado um maior carregamento, melhorou o perfil de tensão nas barras críticas. Em alguns sistemas a localização das barras críticas em áreas com alta concentração de carga ativa e reativa, e com deficiência de fontes de reativos, demonstra claramente a fragilidade do sistema frente à instabilidade de tensão, principalmente em barras com baixo suporte de reativos.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Estudos adicionais a partir do Método da Continuação podem ser desenvolvidos. Os tópicos seguintes são sugeridos para trabalhos subsequentes:

- ♦ Determinação de medidas corretivas e preventivas para evitar o colapso de tensão, a partir de informações obtidas dos resultados do Método da Continuação;
- ♦ Implementação de diferentes modelos de carga. A influência da carga é fundamental no problema de estabilidade de tensão. Normalmente nos estudos de fluxo de potência as cargas são representadas por injeções constantes de potência ativa e reativa. Uma opção de representação de cargas estáticas utilizadas para estudos de fluxo de potência e estabilidade é a de impedância constante;
- ♦ Implementação de uma representação mais detalhada dos geradores. Os limites de reativo dos geradores podem exercer uma influência considerável no comportamento das magnitudes de tensões para uma carga variável [Lerm96].

BIBLIOGRAFIA

- [Abe78] Abe, S.; Hamada N.; Isono, A.; Okuda, K.; "Load Flow Convergence in the Vicinity of a Voltage Stability Limit". IEEE Transactions On Power Apparatus Systems, vol. PAS-97, n°.6, Nov/Dec 1978, pp. 1983-1993.
- [Ajja92] Ajarapu, V.; Christy, C.; "The Continuation Power Flow: A Tool for Steady State Voltage Stability Analysis". IEEE Transactions On Power Apparatus and Systems, vol. 7, February 1992, pp. 416-423.
- [Ajja94] Ajarapu, V.; Lau, P.L.; Battula, S.; "An Optimal Reactive Power Planning Strategy Against Voltage Collapse". IEEE Transactions On Power Systems, vol. 9, n°.2, May 1994, pp. 906-917.
- [Barb97] Barboza, L.V.; Análise do Máximo Carregamento de Sistemas de Potência via Métodos de Pontos Interiores. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Abril 1997.
- [Cañi93] Cañizares, C.A.; Alvarado, F.L.; "Point Collapse and Continuation Methods for Large AC/DC Systems". IEEE Transactions on Power Systems, vol.8, n°.1, February 1993, pp. 1-7.

- [Cañi94] Cañizares, C.A.; Souza, A.C.Z.; Quintana, V.H.; "Improving Continuation Methods for Tracing Bifurcation Diagrams in Power Systems". Proceeding Bulk Power System Voltage Phenomena – III Seminar, Davos, Switzerland, August, 1994, pp. 349-358.
- [Cañi96] Cañizares, C.A.; Souza, A.C.Z.; Quintana, V.H.; Comparison of Performance Indices for Detection of Proximity to Voltage Collapse". IEEE Transactions on Power Systems, vol.11, n°.3, August 1996, pp. 1441-1450.
- [Chan82] Chan, T.F.; Keller, H.B.; "Arclength Continuation and Multigrid Techniques for Nonlinear Elliptic Eigenvalue Problems". SIAM J. Sci. Stat. Comput., vol. 3, n°.2, June 1982, pp. 173-194.
- [Chia95] Chiang, H.; Flueck, A.J.; Shah, K.S.; Balu, N.; "CPFLOW: A Practical Tool for Tracing Power System Steady-State Stationary Behavior due to Load and Generation Variations". IEEE Transactions on Power Systems, vol. 10, n°.2, May 1995, pp.623-634.
- [Deck81] Decker, D.W.; Keller, H.B.; "Path Following Near Bifurcation". Comm. Pure Appl. Mathematics, vol. 34, 1981, pp. 149-175.
- [Flat90] Flatabo, N.; Ognedal, R.; Carlsen, T.; "Voltage Stability Condition in a Power Transmission System Calculated by Sensitivity Methods". IEEE Transactions on Power Systems, vol.5, November 1990, pp. 1286-1293.
- [Gali92] Galiana, F.D.; Zeng, Z.C.; "Analysis of the Load Flow Behaviour Near a Jacobian Singularity". IEEE Transactions on Power Systems, vol.7, n°.3, August 1992, pp. 1362-1369.

- [Gao92] Gao, B.; Kundur, P.; Morison, G.K.; "Voltage Stability using Modal Analysis". IEEE Transactions on Power Systems, vol.7, November 1992, pp. 1529-1542.
- [Göne88] Gönen, Turan; Modern Power System Analysis. Wiley, 1988.
- [Iba90] Iba, K; Suzuki, H.; Egawa, M.; Watanabe, T.; "A Method for Finding a Pair of Multiple Load Flow Solutions in Bulk Power Systems". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol.5, n°.2, May 1990, pp.582-591.
- [Iba91] Iba, K; Suzuki, H.; Egawa, M.; Watanabe, T.; "Calculation of Critical Loading Condition with Nose Curve using Homotopy Continuation Method". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol.6, n°.2, May 1991, pp.582-591.
- [Iris96] Irisarri, G.D.; Wang, X.; Tong, J.; Mokhtari, S.; "Maximum Loadability of Power Systems using Interior Point Non-Linear Optimization Method". IEEE/PES Winter Meeting, Baltimore, USA. Paper 96 WM 207-1 . PWRS., January 1996.
- [Iwam78] Iwamoto, S.; Tamura, Y.; "A Fast Load Flow Method retaining Nonlinearity". IEEE Transactions Power Apparatus and Systems, vol. PAS-97, n°.5, Sept/Oct 1978, pp. 1586-1599.
- [Kubi76] Kubicek, Milan.; "Algorithm 502. Dependence of solution of Nonlinear Systems on a Parameter". ACM. Trans. of Math. Software, vol. 2, n°.1, March 1976.
- [Lemo94] Lemos, F.A.B.; Aplicação de um Método para Análise Estática de Estabilidade de Tensão. Dissertação de Mestrado, UFSC, Maio de 1994.

- [Lerm95] Lerm, A.A.P.; Análise Modal Aplicada à Estabilidade de Tensão com a Inclusão de Modelos Dinâmicos de Cargas. Dissertação de Mestrado, UFSC, Maio 1995.
- [Lerm96] Lerm, A.A.P.; Lemos, F.A.B.; Silva, A.S.; "Inclusion and Evaluation of Generator Limits and Static Var Compensator Models in a Conventional Load Flow Program". Anais do 28th North American Power Symposium, USA, November 1996, pp. 185-191.
- [Mont83] Monticelli, A.; Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica. Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo 1983.
- [Pai89] Pai, M.A.; O'Grady, M.G.; "Voltage Collapse Analysis with Reactive Generation and Voltage Dependent Load Constraints". Electric Machines and Power Systems, vol. 17, 1989, pp. 379-390.
- [Prad92] Prada, R.B.; Souza, A.C.Z.; Vieira Filho, X.; Massaud, A.G.; Oliveira, J.C.C.; "Voltage Stability: Phenomena Characterization based on Reactive Control Effects and System Critical Areas Identification". Proceedings of the Third Sepope meeting, Belo Horizonte, Brasil, Maio 1992, SP-14.
- [Rabi77] Rabinowitz, P.H.: Applications of Bifurcation Theory. Academic Press, New York, 1977.
- [Ramo83] Ramos, D.S.; Dias, E.M.; Sistemas Elétricos de Potência: Regime Permanente. Guanabara Dois, Rio de Janeiro, vol. 2, 1983.
- [Seyd88] Seydel, R.: Practical Bifurcation and Stability Analysis - From Equilibrium to Chaos. Springer-Verlag, New York, 1988.

- [Sodr96] Sodré, E. de A. Avaliação Estática da Estabilidade de Tensão usando Método da Continuação. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, julho 1996.
- [Souz94] Souza, A.C.Z.; Quintana, V.H.; "New Technique of Network Partitioning for Voltage Collapse Margin Calculations". IEE Proceeding-Generation, Transmission, Distribution, vol. 141, n° 6, November 1994, pp. 630-636.
- [Souz96] Souza, A.C.Z.; "Determinação da Barra Crítica e do Ponto de Colapso pelo Vetor Tangente". XI CBA, Anais, vol. 3, São Paulo, 2 a 6 de Setembro de 1996, pp. 1393-1398.
- [Souz97] Souza, A.C.Z.; Cañizares, C.A. & Quintana, V.H.; "New Techniques to Speed Up Voltage Collapse Computations Using Tangent Vectors". IEEE Transactions on Power Systems, vol 12, n° 3, August 1997, pp. 1380-1387.
- [Stag79] Stagg, G.W. & El-Abiad, A.H.; Computer Methods in Power System Analysis. New York, McGraw-Hill, 1979.
- [Stev86] Stevenson, W.D.; Elementos de Análise de Sistemas de Potência. 2ª ed, McGraw-Hill, São Paulo, 1986.
- [Tamu83] Tamura, Y.; Mori, H.; Iwamoto, S.: "Relationship Between Voltage Instability and Multiple Load Flow Solutions in Electric Power Systems". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-102, n° 5, May 1983, pp. 1115-1125.
- [Tayl94] Taylor, Carson W.: Power System Voltage Stability. McGraw-Hill, Inc, 1984.

- [Tira88] Tiranuchit, A.; Thomas, R.J.; "A Posturing Strategy Against Voltage Instabilities in Electric Power Systems". IEEE Transactions on Power Systems, vol. 3, February 1988, pp.87-93.
- [Van91] Van Cutsem, T.; "A Method to Compute Reactive Power Margins with respect to Voltage Collapse". IEEE Transactions on Power Systems, vol. 6, February 1991, pp.145-156.
- [Yori91] Yorino, N.; Harada, S.; Sasaki, H.; "Use of Multiple Load Flow Solutions to Approximate a Closest Loadability Limit". Proc. Bulk Power System Voltage Phenomena II – Voltage Stability and Security. ECC Inc. Fairfax VA, August 1991.
- [Yori96] Yorino, N.; Harada, S.; Cheng, H.; "A Method to Approximate a Closest Loadability Limit using Multiple Load Flow Solution". IEEE/PES Winter Meeting, Baltimore, USA. Paper 96 WM 309-5 PWRs., January 1996.
- [Zeng93] Zeng, Z.C.; Galiana, F.D.; Ooi, B.T.; Yorino, N.; "A Simplified Approach to Estimate Maximum Loading Conditions in the Load Flow Problem". IEEE Transactions on Power Systems, vol. 8, n° 2, May 1993, pp. 646-654.
- [PFLO96] MANUAL PFLOW: Continuation and Direct Methods to Locate Fold Bifurcations in AC/DC/FACTS Power Systems. Cañizares, Claudio A.; Alvarado, Fernando L. December 20, 1996.
- [FLUP97] MANUAL FLUPOT: Programa de Fluxo de Potência Ótimo – FLUPOT. Manual do Usuário – V3.0 – 01/97.

APÊNDICE A

FORMULAÇÃO DO FLUXO DE POTÊNCIA EM COORDENADAS CARTESIANAS

A.1 INTRODUÇÃO

A determinação do fluxo de carga em regime permanente requer a resolução de um sistema de equações algébricas não-lineares, para a qual o método de Newton-Raphson é freqüentemente adotado principalmente devido as suas características de convergência. Em coordenadas cartesianas, as variáveis são representadas em termos da parte real e imaginária ($V = e + jf$), e as equações de fluxo de carga são um conjunto de equações algébricas quadráticas [Gali92].

As características do cálculo do fluxo de potência pelo método de Newton-Raphson em coordenadas retangulares facilitam a determinação de soluções múltiplas [Iba90]. Em coordenadas polares, há uma certa dificuldade na convergência para a segunda solução [Iba90].

A potência aparente complexa na barra i , em função da tensão e corrente (fasores), na barra pode ser escrita como [Ramo83]:

$$S_i = V_i I_i^* \quad (\text{A. 1})$$

Da equação (A. 1), considerando-se o conjugado de ambos os membros e explicitando-se a potência aparente em função de suas componentes retangulares

$$P_i - jQ_i = V_i^* I_i \quad (\text{A.2})$$

Pode-se representar a rede elétrica com a seguinte relação

$$[I] = [Y_{\text{barra}}] [V] \quad (\text{A.3})$$

onde: $[I]$ = vetor coluna das correntes injetadas nas barras

$[V]$ = vetor coluna das tensões nas barras

$[Y_{\text{barra}}]$ = matriz de admitância nodal

Escrevendo a equação (A.3) para uma determinada barra i , obtém-se

$$\dot{I}_i = y_{i1} \dot{V}_1 + y_{i2} \dot{V}_2 + \dots + y_{ii} \dot{V}_i + \dots + y_{in} \dot{V}_n \quad (\text{A.4})$$

onde n é o número de barras do sistema elétrico.

Substituindo a equação (A.4) na equação (A.2), obtém-se a expressão da potência na barra i ,

$$P_i - jQ_i = \dot{V}_i^* \sum_{j=1}^n y_{ij} \dot{V}_j \quad (\text{A.5})$$

A.2 O MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON EM COORDENADAS CARTESIANAS

Definindo-se em coordenadas retangulares

$$\begin{aligned} \dot{V}_i &= e_i + jf_i && \text{tensão na barra } i \\ S_i &= P_i - jQ_i && \text{potência na barra } i \\ y_{ij} &= G_{ij} + jB_{ij} && \text{elemento } ij \text{ na matriz } Y_{\text{barra}} \end{aligned}$$

a equação (A.5) torna-se

$$P_i - jQ_i = (e_i + jf_i) \sum_{j=1}^n (G_{ij} + jB_{ij})(e_j + jf_j) \quad (\text{A.6})$$

Assim, as equações fundamentais do fluxo de carga são

$$P_i = \sum_{j=1}^n [e_i (e_j G_{ij} - f_j B_{ij}) + f_i (f_j G_{ij} + e_j B_{ij})] \quad (\text{A.7})$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n [f_i (e_j G_{ij} - f_j B_{ij}) - e_i (f_j G_{ij} + e_j B_{ij})] \quad (\text{A.8})$$

$$|V_i|^2 = e_i^2 + f_i^2 \quad (\text{A.9})$$

No cálculo do fluxo de carga, duas variáveis, isto é, P e Q ou P e $|V|$ são especificadas em cada barra, exceto para barra de folga, e as tensões e e f são incógnitas. Uma tensão de referência é especificada na barra de folga.

Das equações (A.7), (A.8) e (A.9) é possível identificar formas quadráticas tais como $e_i e_j$, $e_i f_j$, $f_i f_j$, $e_j f_i$, e_i^2 e f_i^2 . Assim, nota-se que o problema de fluxo de

carga é pode ser interpretado como a solução de um conjunto de equações algébricas quadráticas [Iwam78].

A equação (A.9) reflete a restrição ao módulo da tensão que deve permanecer constante nas barras PV. Os valores corrigidos, para k -ésima iteração, podem ser expressos como

$$\Delta P^{(k)} = P^{esp} - P^{calc(k)} \quad \text{para todas as barras, com exceção da de folga}$$

$$\Delta Q^{(k)} = Q^{esp} - Q^{calc(k)} \quad \text{para as barras PQ}$$

$$\Delta |V_i|^2 = |V_i^{esp}|^2 - |V_i^{calc}|^2 \quad \text{para as barras PV}$$

Expandindo-se em série de Taylor o conjunto formado pelas equações (A.7), (A.8) e (A.9),

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_n \\ \Delta |V_r|^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial e_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial e_n} & \frac{\partial P_2}{\partial f_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial f_n} \\ \frac{\partial P_n}{\partial e_2} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial e_n} & \frac{\partial P_n}{\partial f_2} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial f_n} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial e_2} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial e_n} & \frac{\partial Q_2}{\partial f_2} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial f_n} \\ \frac{\partial Q_n}{\partial e_2} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial e_n} & \frac{\partial Q_n}{\partial f_2} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial f_n} \\ \frac{\partial V_r^2}{\partial e_2} & \dots & \frac{\partial V_r^2}{\partial e_n} & \frac{\partial V_r^2}{\partial f_2} & \dots & \frac{\partial V_r^2}{\partial f_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta e_2 \\ \Delta e_n \\ \Delta f_2 \\ \Delta f_n \end{bmatrix} \quad (A.10)$$

Na forma matricial, a equação (A.10) pode ser expressa como

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta |V|^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \\ J_5 & J_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta e \\ \Delta f \end{bmatrix} \quad (A.11)$$

Note-se que a barra l é assumida como barra de folga. As barras de tensão controlada estão representadas por r . Na equação (A.11), as incógnitas são as variações nos componentes real e imaginário das tensões, ou seja, os Δe e Δf . Pode-se observar da

equação (A.10) que duas equações são necessárias para cada barra (exceto a barra de folga) para incluir os termos real e imaginário. Todos os elementos da matriz Jacobiana são funções de e e f . Portanto, eles podem ser calculados utilizando os dados de partida (dados iniciais) para primeira iteração, ou dados da última iteração. Assim, os valores de Δe e Δf podem ser determinados da equação (A.10), após a fatoração da matriz Jacobiana. Os valores resultantes de Δe e Δf podem ser usados na seguinte equação para determinar os novos valores das tensões nas barras para próxima iteração:

$$\begin{aligned} e^{(k+1)} &= e^{(k)} + \Delta e^{(k)} \\ f^{(k+1)} &= f^{(k)} + \Delta f^{(k)} \end{aligned}$$

O processo é repetido até que o valor de ΔP , ΔQ e $\Delta|V|^2$, determinado das equações (A.7), (A.8) e (A.9), é menor do que a tolerância (precisão) especificada.

A dimensão do vetor ΔP é $(n-1)$, caso seja r o número de barras de tensão controlada, a dimensão de ΔQ será $(n-1-r)$, e a dimensão de $\Delta|V|^2$ será r .

Pode-se obter as equações para o cálculo dos elementos do Jacobiano a partir das equações da potência nas barras [Stag79], equações (A.7) e (A.8), e a equação (A.9), relativa as tensões nas barras PV. Diferenciando-se, os elementos fora da diagonal de J_1 são

$$\frac{\partial P_i}{\partial e_j} = e_i G_{ij} + f_i B_{ij} \quad j \neq i$$

e os elementos diagonais,

$$\frac{\partial P_i}{\partial e_i} = 2e_i G_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n (e_j G_{ij} - f_j B_{ij})$$

Os elementos fora da diagonal de J_2 são

$$\frac{\partial P_i}{\partial f_j} = -e_i B_{ij} + f_i G_{ij} \quad j \neq i$$

e os diagonais,

$$\frac{\partial \mathcal{P}_i}{\partial f_i} = 2f_i G_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n (f_j G_{ij} + e_j B_{ij})$$

Diferenciando-se, os elementos fora da diagonal de J_3 são

$$\frac{\partial \mathcal{Q}_i}{\partial e_j} = -e_i B_{ij} + f_i G_{ij} \quad j \neq i$$

e os diagonais,

$$\frac{\partial \mathcal{Q}_i}{\partial e_i} = -2e_i B_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n (-f_j G_{ij} - e_j B_{ij})$$

Os elementos fora da diagonal de J_4 são

$$\frac{\partial \mathcal{Q}_i}{\partial f_j} = -e_i G_{ij} - f_i B_{ij} \quad j \neq i$$

e os elementos pertencentes à diagonal são

$$\frac{\partial \mathcal{Q}_i}{\partial f_i} = -2f_i B_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n (e_j G_{ij} - f_j B_{ij})$$

As derivadas da equação (A.9), que originam os termos das submatrizes J_5 e J_6 são:

Submatriz J_5 :

$$\frac{\partial |V_i^{esp}|^2}{\partial e_i} = 2e_i \leftarrow \text{diagonal principal}$$

$$\frac{\partial |V_i^{esp}|^2}{\partial e_j} = 0 \quad (j \neq i) \leftarrow \text{fora da diagonal}$$

Submatriz J_6 :

$$\frac{\partial |V_i^{esp}|^2}{\partial f_i} = 2f_i \leftarrow \text{diagonal principal}$$

$$\frac{\partial |V_i^{esp}|^2}{\partial f_j} = 0 \quad (j \neq i) \leftarrow \text{fora da diagonal}$$

A.3 ALGORITMO

A solução do problema de fluxo de potência em coordenadas cartesianas via método de Newton-Raphson pode ser resumida no seguinte algoritmo:

1º . Cálculo da matriz Y_{barra} .

Os elementos da matriz são representados como $Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$ e as tensões nas barras como $V_i = e_i + jf_j$.

2º . Cálculo das injeções de potência ativa e reativa nas barras pelas equações (A.7) e (A.8).

3º . Verificação dos limites de potência reativa. Se alguma barra PV ultrapassar o limite, será convertida para barra PQ.

4º . Cálculo dos resíduos de potência ativa e reativa.

$$\Delta P = P^{esp} - P^{calc} \quad \text{para todas as barras com exceção da de folga}$$

$$\Delta Q = Q^{esp} - Q^{calc} \quad \text{para as barras PQ}$$

5º . Testar a convergência. Se os resíduos $|\Delta P|$ e $|\Delta Q|$ forem menores que a tolerância, o processo iterativo convergiu. Nesse caso, o mesmo é encerrado. Senão, prossegue ao

passo 6°.

6° . Formação e cálculo da matriz Jacobiana. As equações que determinam os elementos desta matriz são derivadas das equações de injeção de potência. Para as barras de tensão controlada os valores de e_i e f_i devem satisfazer a relação $|V_i^{exp}|^2 = e_i^2 + f_i^2$.

7° . Resolução do sistema linear:

$$\begin{bmatrix} \Delta e \\ \dots \\ \Delta f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Matriz} \\ JACOBIANA \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta V^2 \end{bmatrix}$$

Obtém-se, então, os Δe e Δf para todas as barras.

8° . Atualização da parte real e imaginária das tensões.

$$\begin{aligned} e^{k+1} &= e^k + \Delta e^k \\ f^{k+1} &= f^k + \Delta f^k \end{aligned}$$

9° . Retorno ao segundo passo.

APÊNDICE B

DADOS DOS SISTEMAS TESTADOS

B.1 INTRODUÇÃO

Neste estudo, foram testados diversos sistemas para analisar o comportamento do Método da Continuação. Os dados dos seguintes sistemas são apresentados neste Apêndice:

- ◆ Sistema IEEE – 14 barras;
- ◆ Sistema IEEE – 57 barras;
- ◆ Sistema IEEE – 118 barras; e
- ◆ Sistema Sul-Sudeste – 176 barras.

Nas seções seguintes, os dados de potência ativa e reativa, geração e carga, estão em MW e Mvar, respectivamente. As tensões estão em por unidade (pu) em uma base de 100 MVA. As resistências, reatâncias e susceptância das linhas de transmissão estão em percentual.

B.2 SISTEMA IEEE - 14 BARRAS

Dados das Linhas de Transmissão					
Da barra	Para barra	r (%)	x (%)	b (%)	tap
1	2	1.93	5.92	5.280	0.00
1	5	5.403	22.30	4.92	0.00
2	3	4.699	19.80	4.38	0.00
2	4	5.811	17.63	3.74	0.00
2	5	5.695	17.39	3.40	0.00
3	4	6.701	17.10	3.46	0.00
4	5	1.335	4.21	1.28	0.00
4	7	0.000	20.91	0.00	0.978
4	9	0.000	55.62	0.00	0.969
5	6	0.000	25.20	0.00	0.932
6	11	9.498	19.89	0.00	0.00
6	12	12.291	25.58	0.00	0.00
6	13	6.615	13.03	0.00	0.00
7	8	0.000	17.61	0.00	0.00
7	9	0.000	11.00	0.00	0.00
9	10	3.181	8.45	0.00	0.00
9	14	12.711	27.04	0.00	0.00
10	11	8.205	19.21	0.00	0.00
12	13	22.092	19.99	0.00	0.00
13	14	17.093	34.80	0.00	0.00

Tabela B.1. Dados das linhas de transmissão do sistema IEEE de 14 barras.

Dados das Barras											
número	tipo	nome	V (pu)	ângulo	P_g	Q_g	$Q_{g\min}$	$Q_{g\max}$	P_d	Q_d	shunt
1	2*	barra1	1.06	0.00	0.0	0.0	-9999	+9999	0.0	0.0	
2	1*	barra2	1.05	0.00	40.0	0.0	-40.0	+40.0	21.7	12.7	
3	1	barra3	1.01	0.00	0.0	0.0	-0.00	+40.0	94.2	19.0	
4	0*	barra4	1.00	0.00	0.0	0.0			47.8	3.9	
5	0	barra5	1.00	0.00	0.0	0.0			7.6	1.6	
6	1	barra6	1.07	0.00	0.0	0.0	-6.00	+24.0	30.0	30.0	

Dados das Barras (cont.)											
número	tipo	nome	V (pu)	ângulo	P_g	Q_g	$Q_{g\min}$	$Q_{g\max}$	P_d	Q_d	shunt
7	0	barra7	1.00	0.00	0.0	0.0			0.0	0.0	
8	1	barra8	1.09	0.00	0.0	0.0	-6.00	+24.0	0.0	0.0	
9	0	barra9	1.00	0.00	0.0	0.0			29.5	16.6	19.0
10	0	barra10	1.00	0.00	0.0	0.0			9.0	5.8	
11	0	barra11	1.00	0.00	0.0	0.0			3.5	1.8	
12	0	barra12	1.00	0.00	0.0	0.0			6.1	1.6	
13	0	barra13	1.00	0.00	0.0	0.0			13.5	5.8	
14	0	barra14	1.00	0.00	0.0	0.0			14.9	5.0	

Tabela B.2. Dados das barras do sistema IEEE de 14 barras

* Barra tipo 0 – Barra PQ

Barra tipo 1 – Barra PV

Barra tipo 2 – Barra V θ

B.3 SISTEMA IEEE - 57 BARRAS

Dados das Linhas de Transmissão					
Da barra	Para barra	r (%)	x (%)	b (%)	tap
1	2	0.830	2.80	12.90	0.00
2	3	2.980	8.50	8.18	0.00
3	4	1.120	3.66	3.80	0.00
4	5	6.250	13.20	2.58	0.00
4	6	4.300	14.80	3.58	0.00
6	7	2.000	10.20	2.76	0.00
6	8	3.390	17.30	4.70	0.00
8	9	0.990	5.05	5.48	0.00
9	10	3.690	16.79	4.40	0.00
9	11	2.580	8.48	2.18	0.00
9	12	6.480	29.50	7.72	0.00
9	13	4.810	15.80	4.06	0.00
13	14	1.320	4.34	1.10	0.00

Dados das Linhas de Transmissão (cont.)					
Da barra	Para barra	r (%)	x (%)	b (%)	tap
13	15	2.690	8.69	2.30	0.00
1	15	1.780	9.10	9.88	0.00
1	16	4.540	20.60	5.46	0.00
1	17	2.380	10.80	2.86	0.00
3	15	1.620	5.30	5.44	0.00
4	18	0.000	55.50	0.00	0.98
4	18	0.000	43.00	0.00	0.98
5	6	3.020	6.41	1.24	0.00
7	8	1.390	7.12	1.94	0.00
10	12	2.770	12.62	3.28	0.00
11	13	2.230	7.32	1.88	0.00
12	13	1.780	5.80	6.04	0.00
12	16	1.800	8.13	2.16	0.00
12	17	3.970	17.90	4.76	0.00
14	15	1.710	5.47	1.48	0.00
18	19	46.100	68.50	0.00	0.00
19	20	28.300	43.40	0.00	0.00
20	21	0.000	77.67	0.00	1.04
21	22	7.360	11.70	0.00	0.00
22	23	0.990	1.52	0.00	0.00
23	24	16.600	25.60	0.84	0.00
24	25	0.000	118.20	0.00	1.00
24	25	0.000	123.00	0.00	1.00
24	26	0.000	4.73	0.00	1.04
26	27	16.500	25.40	0.00	0.00
27	28	6.180	9.54	0.00	0.00
28	29	4.180	5.87	0.00	0.00
7	29	0.000	6.48	0.00	0.97
25	30	13.500	20.20	0.00	0.00
30	31	32.600	49.70	0.00	0.00
31	32	50.700	75.50	0.00	0.00
32	33	3.920	3.60	0.00	0.00
32	34	0.000	95.30	0.00	0.98
34	35	5.200	7.80	0.32	0.00
35	36	4.300	5.37	0.16	0.00

Dados das Linhas de Transmissão (cont.)					
Da barra	Para barra	r (%)	x (%)	b (%)	tap
36	37	2.900	3.66	0.00	0.00
37	38	6.510	10.09	0.20	0.00
37	39	2.390	3.79	0.00	0.00
36	40	3.000	4.66	0.00	0.00
22	38	1.920	2.95	0.00	0.00
11	41	0.000	74.90	0.00	0.96
41	42	20.700	35.20	0.00	0.00
41	43	0.000	41.20	0.00	0.00
38	44	2.890	5.85	0.20	0.00
15	45	0.000	10.42	0.00	0.96
14	46	0.000	7.35	0.00	0.90
46	47	2.300	6.80	0.32	0.00
47	48	1.820	2.33	0.00	0.00
48	49	8.340	12.90	0.48	0.00
49	50	8.010	12.80	0.00	0.00
50	51	13.860	22.00	0.00	0.00
10	51	0.000	7.12	0.00	0.93
13	49	0.000	19.10	0.00	0.90
29	52	14.420	18.70	0.00	0.00
52	53	7.620	9.84	0.00	0.00
53	54	18.780	23.20	0.00	0.00
54	55	17.320	22.65	0.00	0.00
11	43	0.000	15.30	0.00	0.96
44	45	6.240	12.42	0.40	0.00
40	56	0.000	119.50	0.00	0.96
41	56	55.300	54.90	0.00	0.00
42	56	21.250	35.40	0.00	0.00
39	57	0.000	135.50	0.00	0.98
56	57	17.400	26.00	0.00	0.00
38	49	11.500	17.70	0.60	0.00
38	48	3.120	4.82	0.00	0.00
9	55	0.000	12.05	0.00	0.94

Tabela B.3. Dados das linhas de transmissão do sistema IEEE de 57 barras

Dados das Barras										
número	tipo	V (pu)	ângulo	P_g	Q_g	$Q_{g\min}$	$Q_{g\max}$	P_d	Q_d	shunt
1	2	1.04	.00	0.0	0.0	-9999	+9999	55.0	17.0	
2	1	1.01	.00	90.1	0.0	-17.0	+50.0	3.0	88.0	
3	1	0.99	.00	90.4	0.0	-10.0	+60.0	41.0	21.0	
4	0	1.00	.00	0.0	0.0			0.0	0.0	
5	0	1.00	.00	0.0	0.0			13.0	4.0	
6	1	0.98	.00	70.0	0.0	-08.0	+25.0	75.0	2.0	
7	0	1.00	.00	0.0	0.0			0.0	0.0	
8	1	1.00	.00	180.0	0.0	-140.	+200.	150.0	22.0	
9	1	0.98	.00	140.0	0.0	-03.0	+09.0	121.0	26.0	
10	0	1.00	.00	0.0	0.0			5.0	2.0	
11	0	1.00	.00	0.0	0.0			0.0	0.0	
12	1	1.01	.00	100.0	0.0	-50.0	+155.	377.0	24.0	
13	0	1.00	.00	0.0	0.0			18.0	2.3	
14	0	1.00	.00	0.0	0.0			10.5	5.3	
15	0	1.00	.00	0.0	0.0			22.0	5.0	
16	0	1.00	.00	0.0	0.0			43.0	3.0	
17	0	1.00	.00	0.0	0.0			42.0	8.0	
18	0	1.00	.00	0.0	0.0			27.2	9.8	10.00
19	0	1.00	.00	0.0	0.0			3.3	0.6	
20	0	1.00	.00	0.0	0.0			2.3	1.0	
21	0	1.00	.00	0.0	0.0			0.0	0.0	
22	0	1.00	.00	0.0	0.0			0.0	0.0	
23	0	1.00	.00	0.0	0.0			6.3	2.1	
24	0	1.00	.00	0.0	0.0			0.0	0.0	
25	0	1.00	.00	0.0	0.0			6.3	3.2	5.90
26	0	1.00	.00	0.0	0.0			0.0	0.0	
27	0	1.00	.00	0.0	0.0			9.3	0.5	
28	0	1.00	.00	0.0	0.0			4.6	2.3	
29	0	1.00	.00	0.0	0.0			17.0	2.6	
30	0	1.00	.00	0.0	0.0			3.6	1.8	
31	0	1.00	.00	0.0	0.0			5.8	2.9	
32	0	1.00	.00	0.0	0.0			1.6	0.8	
33	0	1.00	.00	0.0	0.0			3.8	1.9	
34	0	1.00	.00	0.0	0.0			0.0	0.0	

Dados das Barras (cont.)										
número	tipo	V (pu)	ângulo	P_g	Q_g	$Q_{g\min}$	$Q_{g\max}$	P_d	Q_d	shunt
35	0	1.00	.00	0.0	0.0			6.0	3.0	
36	0	1.00	.00	0.0	0.0			0.0	0.0	
37	0	1.00	.00	0.0	0.0			0.0	0.0	
38	0	1.00	.00	0.0	0.0			14.0	7.0	
39	0	1.00	.00	0.0	0.0			0.0	0.0	
40	0	1.00	.00	0.0	0.0			0.0	0.0	
41	0	1.00	.00	0.0	0.0			6.3	3.0	
42	0	1.00	.00	0.0	0.0			7.1	4.0	
43	0	1.00	.00	0.0	0.0			2.0	1.0	
44	0	1.00	.00	0.0	0.0			12.0	1.8	
45	0	1.00	.00	0.0	0.0			0.0	0.0	
46	0	1.00	.00	0.0	0.0			0.0	0.0	
47	0	1.00	.00	0.0	0.0			29.7	11.6	
48	0	1.00	.00	0.0	0.0			0.0	0.0	
49	0	1.00	.00	0.0	0.0			18.0	8.5	
50	0	1.00	.00	0.0	0.0			21.0	10.5	
51	0	1.00	.00	0.0	0.0			18.0	5.3	
52	0	1.00	.00	0.0	0.0			4.9	2.2	
53	0	1.00	.00	0.0	0.0			20.0	10.0	6.30
54	0	1.00	.00	0.0	0.0			4.1	1.4	
55	0	1.00	.00	0.0	0.0			6.8	3.4	
56	0	1.00	.00	0.0	0.0			7.6	2.2	
57	0	1.00	.00	0.0	0.0			6.7	2.0	

Tabela B.4. Dados das barras do sistema IEEE de 57 barras

B.4 SISTEMA IEEE - 118 BARRAS

Dados das Linhas de Transmissão					
Da barra	Para barra	r (%)	x (%)	b (%)	tap
1	2	3.030	9.99	2.54	0.00
1	3	1.290	4.24	1.08	0.00

Dados das Linhas de Transmissão (cont.)					
Da barra	Para barra	r (%)	x (%)	b (%)	tap
4	5	0.176	0.80	0.21	0.00
3	5	2.410	10.80	2.84	0.00
5	6	1.190	5.40	1.43	0.00
6	7	0.459	2.08	0.55	0.00
8	9	0.244	3.05	116.20	0.00
5	8	0.000	2.67	0.00	0.985
9	10	0.258	3.22	123.00	0.00
4	11	2.090	6.88	1.75	0.00
5	11	2.030	6.82	1.74	0.00
11	12	0.595	1.96	0.50	0.00
2	12	1.870	6.16	1.57	0.00
3	12	4.840	16.00	4.06	0.00
7	12	0.862	3.40	0.87	0.00
11	13	2.225	7.31	1.88	0.00
12	14	2.150	7.07	1.82	0.00
13	15	7.440	24.44	6.27	0.00
14	15	5.950	19.50	5.02	0.00
12	16	2.120	8.34	2.14	0.00
15	17	1.320	4.37	4.44	0.00
16	17	4.540	18.01	4.66	0.00
17	18	1.230	5.05	1.30	0.00
18	19	1.119	4.93	1.14	0.00
19	20	2.520	11.70	2.98	0.00
15	19	1.200	3.94	1.01	0.00
20	21	1.830	8.49	2.16	0.00
21	22	2.090	9.70	2.46	0.00
22	23	3.420	15.90	4.04	0.00
23	24	1.350	4.92	4.98	0.00
23	25	1.560	8.00	8.64	0.00
25	26	0.000	3.82	0.00	0.960
25	27	3.180	16.30	17.64	0.00
27	28	1.913	8.55	2.16	0.00
28	29	2.370	9.43	2.38	0.00
17	30	0.000	3.88	0.00	0.960
26	30	0.799	8.60	91.80	0.00

Dados das Linhas de Transmissão (cont.)					
Da barra	Para barra	r (%)	x (%)	b (%)	tap
8	30	0.431	5.04	51.40	0.00
17	31	4.740	15.63	3.99	0.00
29	31	1.080	3.31	0.83	0.00
23	32	3.170	11.53	11.73	0.00
31	32	2.980	9.85	2.51	0.00
27	32	2.290	7.55	1.93	0.00
15	33	3.800	12.44	3.19	0.00
19	34	7.520	24.70	6.32	0.00
35	36	0.224	1.02	0.27	0.00
35	37	1.100	4.97	1.32	0.00
33	37	4.150	14.20	3.66	0.00
34	36	0.871	2.68	0.57	0.00
34	37	0.256	0.94	0.99	0.00
37	38	0.000	3.75	0.00	0.938
37	39	3.210	10.60	2.70	0.00
37	40	5.930	16.80	4.20	0.00
30	38	0.464	5.40	42.20	0.00
39	40	1.840	6.05	1.55	0.00
40	41	1.450	4.87	1.22	0.00
40	42	5.550	18.30	4.66	0.00
41	42	4.100	13.50	3.44	0.00
43	44	6.080	24.54	6.07	0.00
34	43	4.130	16.81	4.23	0.00
44	45	2.240	9.01	2.24	0.00
45	46	4.000	13.56	3.32	0.00
46	47	3.800	12.70	3.16	0.00
46	48	6.010	18.90	4.72	0.00
47	49	1.910	6.25	1.60	0.00
42	49	3.580	16.10	17.20	0.00
45	49	6.840	18.60	4.44	0.00
48	49	1.790	5.05	1.26	0.00
49	50	2.670	7.52	1.87	0.00
49	51	4.860	13.70	3.42	0.00
51	52	2.030	5.88	1.40	0.00
52	53	4.050	16.35	4.06	0.00

Dados das Linhas de Transmissão (cont.)					
Da barra	Para barra	r (%)	x (%)	b (%)	tap
53	54	2.630	12.20	3.11	0.00
49	54	9.850	32.40	8.28	0.00
54	55	1.690	7.07	2.02	0.00
54	56	0.275	0.96	0.73	0.00
55	56	0.488	1.51	0.37	0.00
56	57	3.430	9.66	2.42	0.00
50	57	4.740	13.40	3.32	0.00
56	58	3.430	9.66	2.42	0.00
51	58	2.550	7.19	1.79	0.00
54	59	5.030	22.93	5.98	0.00
56	59	4.070	12.00	11.04	0.00
55	59	4.739	21.58	5.65	0.00
59	60	3.170	14.50	3.76	0.00
59	61	3.280	15.00	3.88	0.00
60	61	0.264	1.35	1.46	0.00
60	62	1.230	5.61	1.47	0.00
61	62	0.824	3.76	0.98	0.00
59	63	0.000	3.86	0.00	0.960
63	64	0.172	2.00	21.60	0.00
61	64	0.000	2.68	0.00	0.985
38	65	0.901	9.86	114.60	0.00
64	65	0.269	3.02	38.00	0.00
49	66	0.900	4.59	4.96	0.00
62	66	4.820	21.80	5.78	0.00
62	67	2.580	11.70	3.10	0.00
65	66	0.000	3.70	0.00	0.935
66	67	2.240	10.15	2.68	0.00
65	68	0.138	1.60	63.80	0.00
47	69	8.440	27.78	7.09	0.00
49	69	9.850	32.40	8.28	0.00
68	69	0.000	3.70	0.00	0.935
69	70	3.000	12.70	12.20	0.00
24	70	10.220	41.15	10.20	0.00
70	71	0.882	3.55	0.88	0.00
24	72	4.880	19.60	4.88	0.00

Dados das Linhas de Transmissão (cont.)					
Da barra	Para barra	r (%)	x (%)	b (%)	tap
71	72	4.460	18.00	4.44	0.00
71	73	0.866	4.54	1.18	0.00
70	74	4.010	13.23	3.37	0.00
70	75	4.280	14.10	3.60	0.00
69	75	4.050	12.20	12.40	0.00
74	75	1.230	4.06	1.03	0.00
76	77	4.440	14.80	3.68	0.00
69	77	3.090	10.10	10.38	0.00
75	77	6.010	19.99	4.98	0.00
77	78	0.376	1.24	1.26	0.00
78	79	0.546	2.44	0.65	0.00
77	80	1.080	3.31	7.00	0.00
79	80	1.560	7.04	1.87	0.00
68	81	0.175	2.02	80.80	0.00
80	81	0.000	3.70	0.00	0.935
77	82	2.980	8.53	8.17	0.00
82	83	1.120	3.66	3.80	0.00
83	84	6.250	13.20	2.58	0.00
83	85	4.300	14.80	3.48	0.00
84	85	3.020	6.41	1.23	0.00
85	86	3.500	12.30	2.76	0.00
86	87	2.828	20.74	4.45	0.00
85	88	2.000	10.20	2.76	0.00
85	89	2.390	17.30	4.70	0.00
88	89	1.390	7.12	1.93	0.00
89	90	1.580	6.53	15.88	0.00
90	91	2.540	8.36	2.14	0.00
89	92	0.790	3.80	9.62	0.00
91	92	3.870	12.72	3.27	0.00
92	93	2.580	8.48	2.18	0.00
92	94	4.810	15.80	4.06	0.00
93	94	2.230	7.32	1.88	0.00
94	95	1.320	4.34	1.11	0.00
80	96	3.560	18.20	4.94	0.00
82	96	1.620	5.30	5.44	0.00

Dados das Linhas de Transmissão (cont.)					
Da barra	Para barra	r (%)	x (%)	b (%)	tap
94	96	2.690	8.69	2.30	0.00
80	97	1.830	9.34	2.54	0.00
80	98	2.380	10.80	2.86	0.00
80	99	4.540	20.60	5.46	0.00
92	100	6.480	29.50	7.72	0.00
94	100	1.780	5.80	6.04	0.00
95	96	1.710	5.47	1.47	0.00
96	97	1.730	8.85	2.40	0.00
98	100	3.970	17.90	4.76	0.00
99	100	1.800	8.13	2.16	0.00
100	101	2.770	12.62	3.28	0.00
92	102	1.230	5.59	1.46	0.00
101	102	2.460	11.20	2.84	0.00
100	103	1.600	5.25	5.36	0.00
100	104	4.510	20.40	5.41	0.00
103	104	4.660	15.84	4.07	0.00
103	105	5.350	16.25	4.08	0.00
100	106	6.050	22.90	6.20	0.00
104	105	0.994	3.78	0.99	0.00
105	106	1.400	5.47	1.43	0.00
105	107	5.300	18.30	4.72	0.00
105	108	2.610	7.03	1.84	0.00
106	107	5.300	18.30	4.72	0.00
108	109	1.050	2.88	0.76	0.00
103	110	3.906	18.13	4.61	0.00
109	110	2.780	7.62	2.02	0.00
110	111	2.200	7.55	2.00	0.00
110	112	2.470	6.40	6.20	0.00
17	113	0.913	3.01	0.77	0.00
32	113	6.150	20.30	5.18	0.00
32	114	1.350	6.12	1.63	0.00
27	115	1.640	7.41	1.97	0.00
114	115	0.230	1.04	0.28	0.00
68	116	0.034	0.40	16.40	0.00
12	117	3.290	14.00	3.58	0.00

Dados das Linhas de Transmissão (cont.)					
Da barra	Para barra	r (%)	x (%)	b (%)	tap
75	118	1.450	4.81	1.20	0.00
76	118	1.640	5.44	1.36	0.00

Tabela B.5. Dados das linhas de transmissão do sistema IEEE de 118 barras

Dados das Barras										
número	tipo	V (pu)	ângulo	P_g	Q_g	$Q_{g_{mín}}$	$Q_{g_{máx}}$	P_d	Q_d	shunt
1	0	1.000	.00	0.0	0.0			51.0	27.0	
2	0	1.000	.00	0.0	0.0			20.0	9.0	
3	0	1.000	.00	0.0	0.0			39.0	10.0	
4	1	0.998	.00	0.0	0.0	-40.0	+120.	39.0	12.0	
5	0	1.000	.00	0.0	0.0			0.0	0.0	-40.00
6	0	1.000	.00	0.0	0.0			52.0	22.0	
7	0	1.000	.00	0.0	0.0			19.0	2.0	
8	1	1.015	.00	0.0	0.0	-350.	+220.	28.0	0.0	
9	0	1.000	.00	0.0	0.0			0.0	0.0	
10	1	1.050	.00	450.0	0.0	-200.	+340.	0.0	0.0	
11	0	1.000	.00	0.0	0.0			70.0	23.0	
12	1	0.990	.00	85.0	0.0	-15.0	+75.0	47.0	10.0	
13	0	1.000	.00	0.0	0.0			34.0	16.0	
14	0	1.000	.00	0.0	0.0			14.0	1.0	
15	0	1.000	.00	0.0	0.0			90.0	30.0	
16	0	1.000	.00	0.0	0.0			25.0	10.0	
17	0	1.000	.00	0.0	0.0			11.0	3.0	
18	0	1.000	.00	0.0	0.0			60.0	34.0	
19	0	1.000	.00	0.0	0.0			45.0	25.0	
20	0	1.000	.00	0.0	0.0			18.0	3.0	
21	0	1.000	.00	0.0	0.0			14.0	8.0	
22	0	1.000	.00	0.0	0.0			10.0	5.0	
23	0		.000	.00	0.0	0.	0		7.0	3.0
24	1	0.992	.00	0.0	0.0	-40.0	+240.	13.0	0.0	
25	1	1.050	.00	220.0	0.0	-224.	+300.	0.0	0.0	
26	1	1.015	.00	314.0	0.0	-400.	+225.	0.0	0.0	
27	1	0.968	.00	0.0	0.0	-8.00	+40.0	71.0	13.0	
28	0	1.000	.00	0.0	0.0			17.0	7.0	

Dados das Barras (cont.)										
número	tipo	V (pu)	ângulo							shunt
29	0	1.000	.00	0.0	0.0			24.0	4.0	
30	0	1.000	.00	0.0	0.0			0.0	0.0	
31	1	0.967	.00	7.0	0.0	-15.0	+40.0	43.0	27.0	
32	0	1.000	.00	0.0	0.0			59.0	23.0	
33	0	1.000	.00	0.0	0.0			23.0	9.0	
34	0	1.000	.00	0.0	0.0			59.0	26.0	13.98
35	0	1.000	.00	0.0	0.0			33.0	9.0	
36	0	1.000	.00	0.0	0.0			31.0	17.0	
37	0	1.000	.00	0.0	0.0			0.0	0.0	-25.0
38	0	1.000	.00	0.0	0.0			0.0	0.0	
39	0	1.000	.00	0.0	0.0			27.0	11.0	
40	1	0.970	.00	0.0	0.0	-50.0	+50.0	66.0	23.0	
41	0	1.000	.00	0.0	0.0			37.0	10.0	
42	1	0.985	.00	0.0	0.0	-15.0	+75.0	96.0	23.0	
43	0	1.000	.00	0.0	0.0				18.	0 7.0
44	0	1.000	.00	0.0	0.0			16.0	8.0	10.00
45	0	1.000	.00	0.0	0.0			53.0	22.0	10.00
46	1	1.005	.00	19.0	0.0	-8.00	+40.0	28.0	10.0	10.00
47	0	1.000	.00	0.0	0.0			34.0	0.0	
48	0	1.000	.00	0.0	0.0			20.0	11.0	15.03
49	1	1.025	.00	204.0	0.0	-24.0	+120.	87.0	30.0	
50	0	1.000	.00	0.0	0.0			17.0	4.0	
51	0	1.000	.00	0.0	0.0			17.0	8.0	
52	0	1.000	.00	0.0	0.0			18.0	5.0	
53	0	1.000	.00	0.0	0.0			23.0	11.0	
54	1	0.955	.00	48.0	0.0	-8.00	+40.0	113.0	32.0	
55	0	1.000	.00	0.0	0.0			63.0	22.0	
56	0	1.000	.00	0.0	0.0			84.0	18.0	
57	0	1.000	.00	0.0	0.0			12.0	3.0	
58	0	1.000	.00	0.0	0.0			12.0	3.0	
59	1	0.985	.00	155.0	0.0	-85.0	+200.	277.0	113.0	
60	0	1.000	.00	0.0	0.0			78.0	3.0	
61	1	0.995	.00	160.0	0.0	-165.	+75.0	0.0	0.0	
62	0	1.000	.00	0.0	0.0			77.0	14.0	

Dados das Barras (cont.)										
número	tipo	V (pu)	ângulo	P_g	Q_g	Q_{gmin}	Q_{gmax}	P_d	Q_d	shunt
63	0	1.000	.00	0.0	0.0			0.0	0.0	
64	0	1.000	.00	0.0	0.0			0.0	0.0	
65	1	1.005	.00	391.0	0.0	-300.	+150.	0.0	0.0	
66	1	1.050	.00	392.0	0.0	-45.0	+200.	39.0	18.0	
67	0	1.000	.00	0.0	0.0			28.0	7.0	
68	0	1.000	.00	0.0	0.0			0.0	0.0	
69	2	1.035	.00	0.0	0.0	-200.	+200.	0.0	0.0	
70	0	1.000	.00	0.0	0.0			66.0	20.4	
71	0	1.000	.00	0.0	0.0			0.0	0.0	
72	1	0.980	.00	0.0	0.0	-8.00	+40.0	12.0	0.0	
73	1	0.991	.00	0.0	0.0	-8.00	+40.0	6.0	0.0	
74	0	1.000	.00	0.0	0.0			68.0	27.0	12.00
75	0	1.000	.00	0.0	0.0			47.0	11.0	
76	0	1.000	.00	0.0	0.0			68.0	36.0	
77	0	1.000	.00	0.0	0.0			61.0	28.0	
78	0	1.000	.00	0.0	0.0			71.0	26.0	
79	0	1.000	.00	0.0	0.0			39.0	32.0	20.00
80	1	1.040	.00	477.0	0.0	-300.	+225.	13.0	26.0	
81	0	1.000	.00	0.0	0.0			0.0	0.0	
82	0	1.000	.00	0.0	0.0			54.0	27.0	20.00
83	0	1.000	.00	0.0	0.0			20.0	10.0	10.00
84	0	1.000	.00	0.0	0.0			11.0	7.0	
85	0	1.000	.00	0.0	0.0			24.0	15.0	
86	0	1.000	.00	0.0	0.0			21.0	10.0	
87	1	1.015	.00	0.0	0.0	-40.0	+75.0	0.0	0.0	
88	0	1.000	.00	0.0	0.0			48.0	10.0	
89	1	1.005	.00	607.0	0.0	-45.0	+220.	0.0	0.0	
90	1	0.985	.00	0.0	0.0	-200.	+150.	163.0	42.0	
91	1	0.980	.00	0.0	0.0	-24.0	+120.	10.0	0.0	
92	0	1.000	.00	0.0	0.0			65.0	10.0	
93	0	1.000	.00	0.0	0.0			12.0	7.0	
94	0	1.000	.00	0.0	0.0			30.0	16.0	
95	0	1.000	.00	0.0	0.0			42.0	31.0	
96	0	1.000	.00	0.0	0.0			38.0	15.0	

Dados das Barras (cont.)										
número	tipo	V (pu)	ângulo	P_g	Q_g	$Q_{g_{mn}}$	$Q_{g_{máx}}$	P_d	Q_d	shunt
97	0	1.000	.00	0.0	0.0			15.0	9.0	
98	0	1.000	.00	0.0	0.0			34.0	8.0	
99	1	1.010	.00	0.0	0.0	-20.0	+40.0	42.0	0.0	
100	1	1.017	.00	252.0	0.0	-48.0	+240.	37.0	18.0	
101	0	.00	0.0	0.0			22.0	15.0		
102	0	1.000	.00	0.0	0.0			5.0	3.0	
103	1	1.010	.00	40.0	0.0	-100.	+240.	23.0	16.0	
104	0	1.000	.00	0.0	0.0			38.0	25.0	
105	0	1.000	.00	0.0	0.0			31.0	26.0	20.00
106	0	1.000	.00	0.0	0.0			43.0	16.0	
107	1	0.952	.00	0.0	0.0	-15.0	+75.0	50.0	12.0	6.00
108	0	1.000	.00	0.0	0.0			2.0	1.0	
109	0	1.000	.00	0.0	0.0			8.0	3.0	
110	0	1.000	.00	0.0	0.0			39.0	30.0	6.00
111	1	0.980	.00	36.0	0.0	-9999	+9999	0.0	0.0	
112	1	0.975	.00	0.0	0.0	-9999	+9999	68.0	13.0	
113	1	0.993	.00	0.0	0.0	-9999	+9999	6.0	0.0	
114	0	1.000	.00	0.0	0.0			8.0	3.0	
115	0	1.000	.00	0.0	0.0			22.0	7.0	
116	1	1.005	0.0	0.0	-9999	+9999	184.0	0.0		
117	0	1.000	.00	0.0	0.0			20.0	8.0	
118	0	1.000	.00	0.0	0.0			33.0	15.0	

Tabela B.6. Dados das barras do sistema IEEE de 118 barras

B.5 SISTEMA SUL-SUDESTE DE 176 BARRAS

Dados de Linhas de Transmissão					
Da barra	Para barra	r (%)	x (%)	b (%)	tap
16	17	12.780	18.810	0.010	0
21	20	0.000	300.00	0	1.000
21	20	0.000	300.00	0	1.000
21	20	0.000	300.00	0	1.000

Dados de Linhas de Transmissão (cont.)					
Da barra	Para barra	r (%)	x (%)	b (%)	tap
22	21	0.000	1.000	0	0
44	31	27.920	39.600	0.620	0
44	32	31.390	44.530	0.699	0
33	15	0.000	41.850	0	0.909
33	15	0.000	100.10	0	0.911
33	15	0.000	106.10	0	0.909
32	33	3.920	9.290	0.170	0
35	17	0.000	104.27	0	1.048
35	18	0.000	300.00	0	1.000
35	19	0.000	300.00	0	1.000
33	35	10.370	26.340	0.420	0
34	35	10.510	15.470	0.220	0
36	31	4.260	6.040	0.090	0
37	35	4.750	7.650	0.090	0
42	38	1.300	4.660	1.250	0
38	39	0.550	1.040	0.020	0
41	23	0.000	110.67	0	1.004
41	24	0.000	61.920	0	0.998
41	24	0.000	66.880	0	0.998
41	24	0.000	53.530	0	1.004
41	39	2.890	5.450	0.100	0
40	41	1.540	3.940	0.059	0
42	22	0.000	65.680	0	0.957
42	22	0.000	84.360	0	0.957
36	42	10.820	15.580	0.239	0
37	42	4.750	7.650	90	0
43	25	0.000	106.27	0	0.975
43	42	4.500	10.850	0.190	0
43	42	4.500	10.850	0.190	0
44	13	0.000	109.07	0	0.980
44	14	0.000	67.360	0	0.987
45	29	0.000	113.60	0	0.998
45	29	0.000	103.47	0	0.998
44	46	15.380	22.150	0.340	0
45	46	1.260	2.750	40	0

Dados de Linhas de Transmissão (cont.)					
Da barra	Para barra	r (%)	x (%)	b (%)	tap
47	55	0.574	16.630	0	0.956
48	56	0.587	14.941	0	0.956
50	1	0.000	113.33	0	0.980
50	1	0.000	112.53	0	0.980
50	2	0.000	104.80	0	1.000
50	2	0.000	106.40	0	1.000
50	2	0.000	61.360	0	1.000
51	3	0.000	104.00	0	1.000
51	4	0.000	66.800	0	1.000
52	9	0.000	65.360	0	0.998
53	5	0.000	65.680	0	0.998
53	6	0.000	64.960	0	0.998
53	6	0.000	65.520	0	0.998
49	53	0.150	0.120	0	0
50	53	12.520	18.430	0.270	0
53	51	24.650	20.790	0.260	0
54	55	0.276	-1.910	0	1.004
54	56	0.268	-1.583	0	1.004
52	54	28.810	23.810	0.310	0
53	54	4.270	10.310	0.180	0
53	54	4.270	10.310	0.180	0
74	65	0.000	78.700	0	0.933
74	66	0.000	37.750	0	0.933
74	67	0.000	38.500	0	0.933
75	68	0.000	201.20	0	1.000
75	69	0.000	143.00	0	1.025
75	70	0.000	142.50	0	1.025
76	71	0.000	109.07	0	0.933
74	76	1.960	7.020	0.119	0
75	76	21.870	41.970	0.750	0
80	82	3.730	5.460	0.080	0
81	82	1.930	4.620	0.080	0
87	90	3.040	8.360	0.160	0
88	90	4.140	11.320	0.220	0
88	90	4.140	11.320	0.220	0

Dados de Linhas de Transmissão (cont.)					
Da barra	Para barra	r (%)	x (%)	b (%)	tap
89	90	1.390	2.040	0.029	0
89	90	1.390	2.040	0.029	0
92	94	0.665	11.107	0	1.000
93	94	0.491	-0.560	0	0.962
97	98	0.040	0.100	0	0
97	98	0.040	0.100	0	0
99	100	0.599	22.470	0	1.000
101	100	0.370	-0.970	0	0.983
109	113	0.034	4.323	0	1.000
110	113	0.034	4.340	0	1.000
111	114	0.034	4.365	0	1.000
112	114	0.034	4.359	0	1.000
119	10	0.000	59.150	0	0.962
119	10	0.000	59.410	0.962	0.873
120	28	0.000	59.150	0	0.975
121	7	0.000	59.710	0	0.999
121	8	0.000	40.850	0	0.988
123	57	0.000	42.000	0	0.979
123	58	0.000	43.050	0	0.998
124	59	0.000	58.840	0	1.000
124	60	0.000	59.540	0	0.998
125	61	0.000	42.050	0	1.002
125	62	0.000	41.900	0	1.008
124	125	3.510	5.460	1.120	0
126	63	0.000	47.960	0	1.008
126	64	0.000	47.720	0	995
127	121	4.592	18.131	4.592	0
122	127	0.132	0.476	0.120	0
143	128	2.690	11.810	2.740	0
123	128	0.030	0.080	0.020	0
131	125	0.470	1.710	8.630	0
132	126	0.075	0.300	2.960	0
133	72	0.000	42.600	0	0.991
133	73	0.000	52.240	0	1.010
133	76	1.448	29.424	0	1.046

Dados de Linhas de Transmissão (cont.)					
Da barra	Para barra	r (%)	x (%)	b (%)	tap
133	76	1.446	29.607	0	1.046
133	76	1.480	30.229	0	1.046
133	127	0.896	3.229	0.818	0
133	128	2.460	10.480	2.500	0
134	77	0.000	60.160	0	1.014
136	78	0.000	34.822	0	1.000
136	79	0.000	34.822	0	1.000
136	82	1.170	33.121	0	0.965
136	82	0.939	16.967	0	0.965
129	136	9.790	24.200	6.540	0
130	136	18.990	42.670	11.190	0
136	135	2.780	11.290	3.060	0
131	137	1.300	4.660	1.250	0
132	137	1.300	4.660	1.250	0
133	137	0.580	2.370	0.650	0
133	137	0.580	2.370	0.650	0
134	137	0.450	1.210	0.290	0
137	135	4.500	18.280	4.969	0
136	137	6.600	26.830	7.280	0
138	11	0.000	59.510	0	0.974
142	98	0.991	31.547	0	0.998
142	98	1.025	32.105	0	0.998
142	98	0.616	18.754	0	0.998
143	142	4.610	18.720	5.090	0
142	138	4.520	17.910	4.880	0
139	142	6.040	14.920	4.030	0
139	142	6.040	14.920	4.030	0
140	142	0.510	1.280	0.340	0
140	142	0.510	1.280	0.340	0
141	142	2.690	6.910	1.720	0
143	55	0.317	18.250	0	0.958
143	56	0.323	18.170	0	0.958
143	144	0.810	2.610	0.680	0
143	138	1.762	6.134	1.694	0
143	121	1.570	5.660	1.440	0

Dados de Linhas de Transmissão (cont.)					
Da barra	Para barra	r (%)	x (%)	b (%)	tap
144	12	0.000	60.460	0	0.977
145	41	0.000	31.360	0	0.946
145	41	0.000	31.200	0	0.946
145	41	0.000	30.240	0	0.946
145	119	2.750	7.390	1.680	0
146	43	0.000	10.800	0	1.024
146	43	0.000	9.940	0	1.024
146	26	0.000	42.500	0	1.016
146	27	0.000	41.050	0	1.016
147	30	0.000	42.200	0	0.988
147	46	0.000	31.160	0	0.974
147	46	0.000	32.800	0	0.974
147	120	1.630	5.780	1.520	0
148	143	4.060	10.490	2.580	0
148	144	2.900	8.010	2.140	0
145	148	2.000	6.350	1.780	0
145	148	2.000	6.350	1.780	0
146	148	0.080	0.280	0.080	0
146	148	0.080	0.280	0.080	0
147	148	3.270	11.455	9.080	0
149	83	0.000	28.700	0	1.020
149	84	0.000	28.700	0	1.020
136	149	0.824	11.826	0	1.020
136	149	0.841	11.826	0	1.020
150	90	0.286	12.008	0	0.959
150	90	0.286	12.008	0	0.959
150	90	0.962	50.337	0	0.959
150	90	0.923	50.304	0	0.959
165	150	0.897	4.637	7.980	0
165	150	0.940	4.842	8.349	0
151	91	0.290	11.995	0	1.058
151	91	0.290	11.995	0	1.058
153	150	3.854	19.936	34.320	0
151	153	3.370	12.500	22.840	0
153	152	1.217	6.180	10.980	0

Dados de Linhas de Transmissão (cont.)					
Da barra	Para barra	r (%)	x (%)	b (%)	tap
154	94	0.195	4.600	0	1.000
154	95	0.203	9.262	0	1.025
154	96	0.196	9.193	0	1.025
152	154	3.739	18.990	33.750	0
153	154	4.601	23.768	40.940	0
155	100	0.143	14.510	0	0.948
101	155	0.811	12.541	0	0.983
101	155	0.514	12.384	0	0.983
101	155	0.509	12.115	0	0.983
154	155	1.503	7.776	13390	0
154	155	1.505	7.776	13.400	0
156	155	1.510	7.732	13.570	0
108	158	0.798	12.320	0	1.000
108	158	0.573	12.360	0	1.000
159	102	0.000	6.957	0	1.025
159	103	0.000	6.957	0	1.025
159	104	0.000	6.957	0	1.025
159	105	0.000	6.957	0	1.025
159	106	0.000	6.957	0	1.025
159	107	0.000	6.957	0	1.025
159	155	3.074	15.885	27.380	0
159	156	1.629	8.344	14.640	0
157	159	3.429	17.781	30.550	0
157	159	3.434	17.771	30.610	0
160	161	2.460	12.652	21.710	0
160	159	3.041	15.718	27.089	0
160	159	3.045	15.738	27.120	0
158	161	0.908	4.708	8.080	0
162	161	2.210	11.475	19.690	0
162	164	1.895	9.704	17.030	0
162	164	1.892	9.776	16.840	0
137	163	1.107	13.104	0	1.096
137	163	1.442	11.810	0	1.096
149	163	2.280	11.828	20.309	0
142	164	0.825	12.661	0	1.110

Dados de Linhas de Transmissão (cont.)					
Da barra	Para barra	r (%)	x (%)	b (%)	tap
142	164	0.767	12.721	0	1.076
142	164	0.765	12.637	0	1.076
142	164	0.957	12.589	0	1.076
165	85	0.000	17.800	0	1.050
165	86	0.000	17.800	0	1.050
149	165	0.014	0.074	0.130	0
148	166	0.564	6.035	0	1.025
148	166	0.348	6.283	0	1.025
148	166	0.809	12.625	0	1.025
148	166	0.809	12.529	0	1.025
166	163	2.532	13.132	22.550	0
166	164	1.280	6.567	11.520	0
166	164	1.267	6.571	11.210	0
166	165	3.741	19.359	32.280	0
115	167	0.039	1.207	0	1.006
168	171	0.154	1.940	236.970	0
168	167	0.110	1.394	170.340	0
169	168	0.159	2.0122	45.770	0
160	169	0.031	1.207	0	1.002
170	116	0.000	4.200	0	1.024
170	117	0.000	4.200	0	1.024
170	118	0.000	4.200	0	1.024
169	170	0.050	0.650	80.490	0
171	170	0.050	0.700	85.750	0
171	113	0.016	1.101	0	1.000
171	114	0.016	1.097	0	1.000
173	172	0.245	3.092	377.740	0
169	173	0.162	2.048	250.170	0
174	171	0.172	2.170	265.160	0
172	174	0.315	3.977	485.720	0
173	174	0.097	1.223	150.460	0
162	175	0.031	1.166	0	1.070
162	175	0.032	1.163	0	1.070
169	175	0.216	2.733	333.860	0
169	175	0.236	2.975	363.370	0

Dados de Linhas de Transmissão (cont.)					
Da barra	Para barra	r (%)	x (%)	b (%)	tap
166	176	0.031	1.152	0	1010
176	175	0.127	1.603	195900	0

Tabela B.7. Dados das linhas de transmissão do sistema sul-sudeste de 176 barras

Dados das Barras											
nro	tipo	nome	V(pu)	Âng.	P_g	Q_g	Q_{gmin}	Q_{gmax}	P_d	Q_d	shunt
1	0	CAMBORIU--24	946	0	0.0	0.0	-999.	999.	6.10	3.00	0.0
2	0	CAMBORIU13.8	940	0	0.0	0.0	-999.	999.	9.00	5.20	3.0
3	0	PICAR.2-13.8	930	0	0.0	0.0	-999.	999.	1.90	0.90	0.0
4	0	PICAR.1-13.8	930	0	0.0	0.0	-999.	999.	3.50	1.70	0.0
5	0	IT.SAL.T3-24	965	0	0.0	0.0	-999.	999.	6.80	3.80	1.8
6	0	ISS-TT1,2-24	976	0	0.0	0.0	-999.	999.	17.3	9.00	1.8
7	0	ITAJAI2-13.8	986	0	0.0	0.0	-999.	999.	3.20	0.50	0.0
8	0	ITAJAI-2--24	988	0	0.0	0.0	-999.	999.	5.90	3.90	0.0
9	0	BRUSQUET1-24	997	0	0.0	0.0	-999.	999.	8.60	2.80	2.4
10	0	BQE-TT2,3-24	979	0	0.0	0.0	-999.	999.	28.4	11.30	4.8
11	0	PICARRAS13.8	986	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00	0.0
12	0	GASPAR—24	979	0	0.0	0.0	-999.	999.	9.00	4.20	0.0
13	0	IBIRAMAT2-24	970	0	0.0	0.0	-999.	999.	1.50	0.70	0.0
14	0	IBIRAMAT1-24	979	0	0.0	0.0	-999.	999.	5.20	2.40	3.0
15	0	TIMBO—24	1004	0	0.0	0.0	-999.	999.	18.5	7.60	0.0
16	1	US.CEDROS-24	957	0	7.3	4.5	-995.	995.	0.10	0.10	0.0
17	0	US.PALMEI.24	932	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00	0.0
18	1	US.PALME.-G2	1000	0	8.6	-2.6	-7.	10.	0.00	0.00	0.0
19	1	US.PALME.-G1	1000	0	8.6	-2.6	-907.	910.	0.00	0.00	0.0
20	1	US.SALTO-8.5	1000	0	3.4	4.5	4.	4.	0.00	0.00	0.0
21	0	US.SALTO--24	988	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00	0.0
22	0	BL.SALTO--24	988	0	0.0	0.0	-999.	999.	27.9	10.10	4.8
23	0	BL.GAR.T8-24	997	0	0.0	0.0	-999.	999.	2.90	2.10	0.0
24	0	BLU.GARCIA24	988	0	0.0	0.0	-999.	999.	23.5	8.60	1.2
25	0	BLUME.2-13.8	962	0	0.0	0.0	-999.	999.	1.80	1.40	0.0
26	0	BLUM.2-T2-24	988	0	0.0	0.0	-999.	999.	5.30	1.50	2.4

Dados das Barras (cont.)											
nro	tipo	nome	V(pu)	Âng.	P_g	Q_g	$Q_{g_{min}}$	$Q_{g_{max}}$	P_d	Q_d	shunt
27	0	BLUM.2-T1-24	988	0	0.0	0.0	-999.	999.	6.30	1.90	2.4
28	0	TROMBUDO-24	988	0	0.0	0.0	-999.	999.	5.00	2.80	0.0
29	0	RIO DO SUL24	992	0	0.0	0.0	-999.	999.	5.60	2.50	0.0
30	0	RIO.SUL-2-24	983	0	0.0	0.0	-999.	999.	10.0	2.60	2.4
31	0	TEKA----69	948	0	0.0	0.0	-999.	999.	4.50	2.50	0.0
32	0	INDAIAL-A-69	920	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00	0.0
33	0	TIMBO----69	913	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00	0.0
34	0	C.VOLTA GR69	929	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.80	0.30	0.0
35	0	US.PALMEI.69	950	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00	0.0
36	0	INDAIAL-B-69	951	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00	0.0
37	0	FIOV/KARS.69	949	0	0.0	0.0	-999.	999.	8.00	4.00	0.0
38	0	ALTONA----69	1006	0	0.0	0.0	-999.	999.	4.00	2.00	0.0
39	0	CREMER----69	1006	0	0.0	0.0	-999.	999.	6.30	2.90	0.0
40	0	ARTEX----69	1012	0	0.0	0.0	-999.	999.	7.00	3.80	0.0
41	0	BL.GARCIA-69	1014	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00	0.0
42	0	BL.SALTO-69	958	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00	0.0
43	0	BLUMENAU2-69	969	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00	0.0
44	0	IBIRAMA--69	959	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00	0.0
45	0	RIO DO SUL69	993	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00	0.0
46	0	RIO.SUL-2-69	993	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00	0.0
47	1	ILHOTA2--13	959	0	0.0	-5.0	-5.	5.	0.50	0.20	0.0
48	1	ILHOTA1--13	960	0	0.0	-5.0	-5.	5.	0.50	0.20	0.0
49	0	C.C.C.P.-69	978	0	0.0	0.0	-999.	999.	3.40	1.20	0.0
50	0	CAMBORIU-69	948	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00	0.0
51	0	PICARRAS-69	954	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00	0.0
52	0	BRUSQUE--69	1000	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00	0.0
53	0	ITAJ.SALS.69	978	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00	0.0
54	0	ILHOTA--69	1000	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00	0.0
55	0	ILHOTA--B00	1012	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00	0.0
56	0	ILHOTA--A00	1012	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00	0.0
57	0	TIJUCAST3-24	988	0	0.0	0.0	-999.	999.	10.0	6.00	0.0
58	0	TIJUCAST2-24	988	0	0.0	0.0	-999.	999.	3.50	1.00	0.0
59	0	INE-TT2-13.8	986	0	0.0	0.0	-999.	999.	3.90	2.80	0.0
60	0	INE-TT1-13.8	986	0	0.0	0.0	-999.	999.	4.00	2.60	0.0

Dados das Barras (cont.)											
nro	tipo	nome	V(pu)	Âng.	P_g	Q_g	$Q_{g\min}$	$Q_{g\max}$	P_d	Q_d	shunt
61	0	TRIN.T2-13.8	986	0	0.0	0.0	-999.	999.	8.00	5.00	1.2
62	0	TRIN.T1-13.8	986	0	0.0	0.0	-999.	999.	8.80	5.50	0.0
63	0	ICO-TT2-13.8	986	0	0.0	0.0	-999.	999.	5.50	3.00	0.0
64	0	ICO-TT1-13.8	986	0	0.0	0.0	-999.	999.	8.00	3.50	0.0
65	0	COQU.T3-13.8	978	0	0.0	0.0	-999.	999.	6.00	3.00	0.0
66	0	COQU.T2-13.8	985	0	0.0	0.0	-999.	999.	4.50	2.50	0.0
67	0	COQU.T1-13.8	984	0	0.0	0.0	-999.	999.	4.50	2.50	0.0
68	0	US.GARC.13.8	970	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.40	0.20	0.0
69	1	US.GARC.6.9B	971	0	4.4	2.0	-2.	2.	0.00	0.00	0.0
70	1	US.GARC.6.9A	971	0	4.4	2.0	-2.	2.	0.00	0.00	0.0
71	0	ROCA.T6-13.8	1000	0	0.0	0.0	-999.	999.	2.00	1.00	0.0
72	0	ROCA.T5-13.8	986	0	0.0	0.0	-999.	999.	11.0	7.00	0.0
73	0	ROCA.T4-13.8	986	0	0.0	0.0	-999.	999.	10.0	8.00	3.0
74	0	COQUEIROS-69	933	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00	0.0
75	0	US.GARCIA-69	974	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00	0.0
76	0	FLORIANO-69	949	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00	0.0
77	0	PALHOCA-13.8	986	0	0.0	0.0	-999.	999.	8.60	6.00	2.4
78	1	JLACERDA-G2	1000	0	0.0	0.0	-999.	999.	1.25	0.60	0.0
79	1	JLACERDA-G1	1000	0	25.0	-12.0	-999.	938.	1.25	0.60	0.0
80	0	TUBA.FICT.69	1006	0	0.0	0.0	-999.	999.	10.0	5.47	0.0
81	0	TUBARAO-69	1000	0	0.0	0.0	-999.	999.	22.5	14.55	0.0
82	0	JLACERDA-69	1014	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00	0.0
83	1	JLACERDA-G4	1000	0	0.0	0.0	-999.	999.	1.65	0.80	0.0
84	1	JLACERDA-G3	976	0	33.0	-4.7	-999.	955.	1.65	0.80	0.0
85	1	JLACERDB-G6	950	0	0.0	0.0	-999.	999.	4.00	2.00	0.0
86	1	JLACERDB-G5	950	0	80.0	9.1	-999.	125.	4.00	2.00	0.0
87	0	CRICIUMA2-69	1022	0	0.0	0.0	-999.	999.	9.00	4.61	0.0
88	0	CRICIUMA-69	1000	0	0.0	0.0	-999.	999.	63.4	23.86	0.0
89	0	SIDER.CEL.69	1027	0	0.0	0.0	-999.	999.	24.4	9.58	0.0
90	0	SIDEROP.-69	1029	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00	0.0
91	0	CHARQUEA-69	1000	0	0.0	0.0	-999.	999.	34.0	15.00	0.0
92	0	PFUNDO-T13	1014	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.50	0.20	0.0
93	0	PFUNDO-138	1000	0	0.0	0.0	-999.	999.	14.0	4.00	0.0
94	0	PFUNDO-T00	1014	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00	0.0

Dados das Barras (cont.)											
nro	tipo	nome	V(pu)	Âng.	P_g	Q_g	$Q_{g_{mín}}$	$Q_{g_{máx}}$	P_d	Q_d	shunt
95	1	PFUNDO2---13	950	0	70.0	-15.3	-999.	1000.	0.00	0.00	0.0
96	1	PFUNDO1--13	950	0	70.0	-15.3	-999.	1000.	0.00	0.00	0.0
97	0	JVILLE.1--69	985	0	0.0	0.0	-999.	999.	37.3	5.94	0.0
98	0	JOINVILL--69	986	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00	0.0
99	0	XANXERE---13	967	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00	-15.0
100	0	XANXERE---00	999	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00	0.0
101	0	XANXERE--138	1000	0	0.0	0.0	-999.	999.	174.	-3.06	0.0
102	1	SOSORIOG6-13	1000	0	0.0	-31.2	-168.	168.	3.30	0.00	0.0
103	1	SOSORIOG5-13	1000	0	0.0	-31.2	-168.	168.	3.30	0.00	0.0
104	1	SOSORIOG4-13	1000	0	125.	-15.6	-168.	168.	0.30	0.00	0.0
105	1	SOSORIOG3-13	1000	0	125.	-15.6	-168.	168.	0.30	0.00	0.0
106	1	SOSORIOG2-13	1000	0	125.	-15.6	-168.	168.	0.30	0.00	0.0
107	1	SOSORIOG1-13	1000	0	125.	-15.6	-168.	168.	0.30	0.00	0.0
108	0	CANOINHAS138	998	0	0.0	0.0	-999.	999.	64.2	-14.8	0.0
109	1	SSANTIAG4-19	950	0	0.0	-79.4	-150.	150.	4.90	0.00	0.0
110	1	SSANTIAG3-19	950	0	300.	-57.8	-150.	150.	0.60	0.00	0.0
111	1	SSANTIAG2-19	950	0	300.	-57.9	-150.	150.	0.60	0.00	0.0
112	1	SSANTIAG1-19	950	0	300.	-58.1	-150.	150.	0.60	0.00	0.0
113	0	SSANTIAG-B00	980	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00	0.0
114	0	SSANTIAG-A00	980	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00	0.0
115	0	LONDRI-E-230	984	0	0.0	0.0	-999.	999.	260.	-21.7	0.0
116	1	SSEGREDG3-13	1000	0	98.5	4.5	-108.	108.	1.47	0.00	0.0
117	1	SSEGREDG2-13	1000	0	98.5	4.5	-108.	108.	1.47	0.00	0.0
118	1	SSEGREDG1-13	1000	0	98.5	4.5	-108.	108.	1.47	0.00	0.0
119	0	BRUSQUE--138	958	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00	0.0
120	0	TROMBUDO-138	974	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00	0.0
121	0	ITAJAI-2-138	984	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00	0.0
122	0	BIGUACU--138	1008	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00	0.0
123	0	TIJUCAS--138	989	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00	0.0
124	0	ILH.NORTE138	997	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00	0.0
125	0	TRINDADE-138	1000	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00	0.0
126	0	IL.CENTRO138	1002	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00	0.0
127	0	E.BIGUACU138	1008	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00	0.0
128	0	TIJUCAS--138	991	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00	0.0

Dados das Barras (cont.)											
nro	tipo	nome	V(pu)	Âng.	P_g	Q_g	$Q_{g\min}$	$Q_{g\max}$	P_d	Q_d	shunt
129	0	S.JOAQUIM138	984	0	0.0	0.0	-999.	999.	11.5	2.12	0.0
130	0	VIDAL-R.J138	968	0	0.0	0.0	-999.	999.	9.66	5.47	0.0
131	0	COQUEIR1-138	1002	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00	0.0
132	0	COQUEIR2-138	1002	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00	0.0
133	0	FLORIANO-138	1004	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00	0.0
134	0	PALH.CEL.138	1010	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00	0.0
135	0	IMBITUBA-138	1000	0	0.0	0.0	-999.	999.	10.2	-5.33	0.0
136	0	JLACERDA-138	1000	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00	0.0
137	0	PALHOCA--138	1014	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00	0.0
138	0	PICARRAS-138	1000	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00	0.0
139	0	SAO BENTO138	996	0	0.0	0.0	-999.	999.	11.9	-15.1	0.0
140	0	JVILLE.4-138	991	0	0.0	0.0	-999.	999.	106.	66.96	0.0
141	0	E.WEG---138	990	0	0.0	0.0	-999.	999.	18.4	6.12	0.0
142	0	JOINVILL-138	1000	0	0.0	0.0	-999.	999.	24.4	5.70	0.0
143	0	ILHOTA---138	985	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00	0.0
144	0	GASPAR---138	985	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00	0.0
145	0	BL.GARCIA138	976	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00	0.0
146	0	BLUMEN.2-138	998	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00	0.0
147	0	RIO.SUL2-138	975	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00	0.0
148	0	BLUMENAU-138	997	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00	0.0
149	0	JLACERDA-230	990	0	0.0	0.0	-999.	999.	1.30	0.00	0.0
150	0	SIDEROP--230	982	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00	0.0
151	0	CHARQUEA-230	998	0	0.0	0.0	-999.	999.	29.4	27.05	0.0
152	0	NPRATA-CE230	1016	0	0.0	0.0	-999.	999.	18.0	9.00	0.0
153	0	FARROUPI-230	1008	0	0.0	0.0	-999.	999.	2.96	-50.8	0.0
154	0	PFUNDO---230	1014	0	0.0	0.0	-999.	999.	98.0	-26.0	0.0
155	0	XANXERE--230	997	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00	0.0
156	0	PBRANCOE-230	992	0	0.0	0.0	-999.	999.	4.00	18.00	0.0
157	0	CMOURAO--230	977	0	0.0	0.0	-999.	999.	71.3	7.95	0.0
158	0	CANOINHA-230	1002	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00	0.0
159	0	SOSORIO--230	997	0	0.0	0.0	-999.	999.	137.	-51.4	0.0
160	0	AREIA---230	991	0	0.0	0.0	-999.	999.	117.	-9.26	0.0
161	0	SMATEUSE-230	1002	0	0.0	0.0	-999.	999.	18.0	8.00	0.0
162	0	CURITIBA-230	1002	0	0.0	0.0	-999.	999.	330.	130.5	0.0
163	0	PALHOCA--230	966	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00	0.0

Dados das Barras											
nro	tipo	nome	V(pu)	Âng.	P_g	Q_g	$Q_{g_{min}}$	$Q_{g_{max}}$	P_d	Q_d	shunt
164	0	JOINVILL-230	977	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00	0.0
165	0	JLACERDB-230	990	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00	0.0
166	0	BLUMENAU-230	1002	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00	0.0
167	0	LONDRINA-500	980	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00	0.0
168	2	IVAIPORA-525	950	0	999.	0.0	-999.	999.	3.10	0.00	0.0
169	0	AREIA---525	985	0	0.0	0.0	-999.	999.	250.	373.3	0.0
170	0	SSEGREDO-525	983	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00	0.0
171	0	SSANTIAG-525	981	0	0.0	0.0	-999.	999.	4.70	0.00	0.0
172	0	GRAVATAI-525	968	0	0.0	0.0	-999.	999.	745.	157.0	-300.
173	0	CNOVOS---525	995	0	0.0	0.0	-999.	999.	2.50	0.00	-200.
174	0	ITA -525	992	0	0.0	0.0	-999.	999.	0.00	0.00	-300.
175	0	CURITIBA-525	958	0	0.0	0.0	-999.	999.	4.40	0.00	-300.
176	0	BLUMENAU-525	947	0	0.0	0.0	-999.	999.	1.60	0.00	0.0

Tabela B.8. Dados das barras do sistema sul-sudeste de 176 barras